

国际机械工程先进技术译丛

金属手册 案头卷

（上册）

原书第2版

METALS HANDBOOK DESK EDITION

(SECOND EDITION)

（美）J.R.Davis（约瑟夫 · R.戴维斯） 等编著

金锡志 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际机械工程先进技术译丛

金属手册案头卷

（上册）

原书第2版

Metals Handbook Desk Edition



机 械 工 业 出 版 社

美国金属学会(ASM)出版的《Metals Handbook》是一部国际公认的金属材料方面的经典著作。本手册是其第2版案头卷的中文版。该手册几乎涉及所有在用金属材料，包括当前航空航天、纳米技术、超导技术等领域所应用的新型金属材料的系统基础理论和实用技术数据，以及有关的最新研究成果，还详细描述了各种金属从采矿、冶炼、铸造、热处理到冷、热加工等的最新制造工艺和检测、试验方法，以及有关摩擦学的实验研究方法。

通览全书，本手册不仅具有权威性，而且内容涉猎广泛、丰富先进，理论深入浅出，图表简明实用。

本书不仅可供广大机械、材料工程师和技术人员在工作中查阅，还可以作为材料学科的辅助教材供有关科研院所研究人员和高等学校师生参考。

Metals Handbook Desk Edition(Second Edition)/**Edited by J. R. Davis etc.**
ISBN: 978-0-87170-654-6

图书在版编目(CIP)数据

金属手册案头卷. 上册/(美)戴维斯(Davis,J. R.)等编著；金锡志译. —北京：机械工业出版社，2010.11
(国际机械工程先进技术译丛)
Metals Handbook Desk Edition
ISBN 978-7-111-30708-2

Ⅰ.①金… Ⅱ.①戴…②金… Ⅲ.①金属材料—技术手册
Ⅳ.①TG14-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第092129号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑：孔 劲 责任编辑：庞 晖 版式设计：霍永明
责任校对：陈延翔 张晓蓉 封面设计：鞠 杨
责任印制：乔 宇
北京铭成印刷有限公司印刷
2011年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm ·78.5印张·2插页·2706千字
0001—3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-30708-2
定价：370.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010)88361066	编辑热线：(010)88379772
销售一部：(010)68326294	门户网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010)88379649	教材网：http://www.cmpedu.com
读者服务部：(010)68993821	**封面无防伪标均为盗版**



金锡志(1943—)，男，教授级高级工程师，1967年毕业于清华大学精密仪器及机械制造系。九三学社成员。

大学毕业后曾长期从事机械(包括仪表)设计和制造工艺工作。1981年8月至1983年9月由国家公派作为访问学者在英国斯旺西大学学院(Swansea University College)机械工程系进修，专攻摩擦学。学成回国后，作为学科带头人先后在兰州炼油厂石油炼制研究所和杭州轴承试验研究中心从事润滑油抗磨机理和滚动接触疲劳机制的摩擦学基础研究。1992年开始在上海汽车研究所负责汽车零部件产品的在线检测和性能测试设备的研发。1996年至2003年，在上海通用汽车公司作为计量、精测室和理化分析室主要负责人负责实验室筹建和相关技术管理工作。

作为资深机械工程专家，译者长期工作在机械行业生产、科研第一线，在其职业生涯里曾取得多项科研成果并获得相应的省、部级科技进步奖和国家专利。1991年由机械部授予有突出贡献专家称号。1983年到1996年曾在国内外有关技术刊物和学术会议发表论文三十余篇，并出版专著《机器磨损及其对策》(机械工业出版社,1996)。

《金属手册》篇目

上　册

下　册

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化的机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术及技术交流方式。早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，

其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料更方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1）精品重点高质　本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2）专家选择把关　本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3）引纳地区广泛　主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4）内容先进丰富　在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等。

5）读者层次面广　面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

中文版序言

久闻由美国金属学会（ASM）出版的《Metals Handbook》是一部国际公认的金属材料方面的经典著作。它从1923年出版以来，经过不断的补充、更新和发展，现已成为21卷（24册）的系列巨著，内容极其丰富。后来为广大读者查阅方便，ASM将其精简成单行本的案头卷《Metals Handbook Desk Edition》，于1983年出版。此书于1998年为庆祝ASM《Metals Handbook》问世75周年而修订再版，故代表了金属材料学科在20世纪末的国际水平，它是美国（部分英国）学界、商界的知名学者、专家积百余年经验、研究和智慧的结晶；它取精用弘，兼顾各面，为美国的工业、经济发展发挥了重要的作用。现国内二位译者不辞辛劳，历经五年多的勤奋砥砺将其翻译成功，并由机械工业出版社分成《金属手册》上、下两册出版，相信它的翔实、简便和实用一定能给国内广大材料工作者和机械工程师的工作和学习带来裨益，为此深感欣慰。

该手册几乎涉及所有在用金属材料，包括当前航空航天、纳米技术、超导技术等领域所应用的新型金属材料的系统基础理论和实用技术数据，以及有关的最新研究成果，还详细描述了各种金属从采矿、冶炼、铸造、热处理到冷热加工等的最新制造工艺和检测、试验方法，以及有关摩擦学的实验研究方法。所以通观全书不仅具有权威性，而且内容涉猎广泛、丰富先进，理论深入浅出，图表简明实用。一册在手，高级专家如锦上添花，一线职工如雪中送炭，院校师生如滋润甘露。

材料学科被公认是当代科技发展最前沿、最具挑战性的高科技学科之一，新材料的研究、开发和应用也始终是引领科技发展的新命题。今天，金属材料依然是日常生活、工农业生产、半导体信息技术、国防工业以及一些尖端技术都不可或缺的，甚至常常是首选考虑的重要领域。而且随着研究技术、生产工艺的不断更新和改进，新的金属材料及其应用也在日新月异地发展。一本好的材料手册问世，其作用也是现在难以估量的。

金属材料由金属元素构成，世间同种的金属元素都完全一样，可是由于技术上的差距却成为各不相同的金属材料。这就需要我们努力学习，不断创新，走向世界的前列，才能从今日的制造大国变成明天的制造强国。

“拿来主义”在一定意义上不失为当今共享人类文明快捷而有效的方法。相信本手册的出版将能为我国的金属材料领域的发展添砖加瓦。谨此祝贺它的出版。

纵然一本金科玉律，也经译者苦工似的劳作，虽亦勤能补拙，但凡人多舛误，希望广大读者提出宝贵意见，使其日后再版能进一步完善。

译 者 前 言

远古人类认识并学会使用金属材料是人类进入史前文明的重要标志之一。随着人类社会的不断发展，人们对金属材料的认识也越来越深入，应用的范围也越来越广泛。可以毫不夸张地说，金属材料现已成为构建人类现代物质文明的基石之一。尽管化学元素周期表上的金属元素不过区区数十种，但是如今可供使用的金属材料（主要为各种合金）的种类已成千上万，而且还在以几何级数的速度增长。诚然，今天非金属材料特别是合成材料大量涌现，并在越来越多的用途上代替金属材料，然而金属材料作为结构材料、装饰材料和生物材料等，仍是日常生活、工农业生产、信息产业、国防工业以及一些尖端技术的应用所不可或缺的，甚至常常作为首选对象被考虑。这当然是由于其可供选择的性能范围极大，且相对容易获取和制造，同时还可以根据需要研制出具有特殊性能的金属材料使然。

现在，金属材料作为一种地球上的重要资源正在被大量地开采、加工和消耗，同时人们也日益认识到其资源如同煤、石油等能源一样是不可再生的。因此，人们不但要研究开发各种新型的金属材料，还要使各种金属材料的潜在性能在满足需要的前提下获得最充分的发挥，从长远来说，人们还必须重视金属材料的回收及再利用。金属材料的冶炼和加工通常需要消耗大量的能源，故金属材料的浪费不仅是资源的浪费，还是能源的浪费；此外，金属材料的随意遗弃还会造成环境污染。总之，人类只有更加“节俭”地使用金属材料，才能给子孙后代留下充足的资源和清洁的环境。所有这些都促使着人们对金属材料的研究上升到一个新水平。

长期以来，世界各国的材料和冶金方面的学者、专家都非常重视对金属材料的研究，并且不断地对其元素组成、物理性质、力学性能、在大气和各种介质中的耐蚀性，以及它们的应用进行系统的总结。美国金属学会（国际）（The American Society for Metal International, ASM）早在1923年，就开始由其前身美国钢铁处理学会陆续出版了一系列小型的数据活页。这些活页经过若干年的发展成为多卷本的参考手册，其每一卷都代表一个完整的专题。经过不断的补充、再版，现已发展成为多达21卷并分成24本的《ASM手册 ASM Handbook》（详细目录附于后面以便读者查询）。1948年，为方便读者查阅，ASM将上述多卷本的金属材料参考书精简出版成单行本，即《金属手册案头卷》（Metals Handbook Desk Edition），使之面向更加广泛的读者受众。1998年ASM为庆祝《ASM手册》出版75周年和《金属手册案头卷》出版50周年，又组织有关专家、学者对《金属手册案头卷》进行了改写，并出版它的第二版，使其在内容上得到了补充和更新。

通览全书，译者以为该手册有以下特点：

权威性。这是一本由ASM组织美国学界、商界的有关金属材料各领域的知名学者、专家集体编撰、修订而成的专业手册，也是ASM过去八十多年来数以千计的冶金工作者的集体智慧和经验的结晶。它代表了金属材料学科在20世纪末的国际水平，虽然其出版已十年多，但作为一本工具书仍不失其重要的参考价值。

内容的丰富和先进性。它不仅囊括所有传统的金属材料，如铁、钢等黑色金属，有色金属以及它们的合金，而且包括粉末冶金和当代许多特种用途的金属材料，同时还涉及当前在航空航天、纳米技术、超导技术、人体生物等领域所应用的各种新型金属材料。从内容上看，它同一般的材料手册一样，载有各种材料的齐全、可靠的技术数据备查，然而其主要篇幅都在于对

各种金属材料的(有关物理、化学和金属学方面的)基础理论、特性和应用的全面阐述，包括当时的最新研究成果。本手册还用了将近一半的篇幅系统论述了各种金属的冶炼、铸造、压力加工、热处理以及切削加工的几乎所有相关制造工艺及其检测技术和试验方法，其中还包括了近年来令人瞩目的有关摩擦学的实验研究方法。特别值得一提的是，本手册还包含多达3000多条与金属材料有关的技术术语的定义或准确解释(译著中仍按原著以英文字母排列)，以及大量的文献目录供读者检索。

简明性。尽管如上所述，本书内容是如此的丰富、翔实，但却丝毫没给人以繁杂的感觉。相反，编写本手册的资深专家们仅用一些深入浅出的语言，就把一些有关材料的深奥理论问题解释得十分清楚。这对于一本置于案头、可信手翻阅的手册来说是非常必要和难得的。可以说，只要具有大中专院校材料专业知识(包括非材料的机械类专业)的人员都能很好地理解和使用本手册。

实用性。本手册还有一个重要的特点，即通过其各章的提示可以非常便捷地追溯到《ASM手册》的相关章节，并且通过各章和书末的参考文献目录，可以检索到更加详细的相关内容。因此，它不仅适合配备于基层工矿企业的资料室里，供广大机械、材料工程师们在工作中不时查阅，还可以作为材料学科的辅助教材供有关科研院所研究人员和高等学校师生参考。

这本手册的原著虽说是单行本，但因其内容丰富而篇幅非常长，译成中文的《金属手册(案头卷)》达数百万字。经与出版社商定，现将其分为上、下两册出版。原著包括五个部分，中译本的上册为原著的前三部分，列为第1篇、第2篇、第3篇；而下册为后两部分，列为第4篇、第5篇。《金属手册(案头卷)》的上册主要由本人担当翻译，尽管翻译的工作量十分繁重，却也丝毫不敢有所懈怠，四年坚持下来终于修成正果，现能将其奉献给广大读者，感到万分欣慰。此书感谢机械工业出版社对本书翻译工作的鼎力支持，以及在翻译、出版过程中编辑孔劲女士的多方指导和帮助。全书的校审工作委托唐波先生组织进行，具体参加的有洪新教授(第1篇)、华伟博士(第2篇)和袁凤松教授级高工、朱祖昌教授(第3篇)。另外还有黄孝胜、倪逸琴、黄亮、蔡闻怡、潘振宇、余晓明、李忆馥、沈仁杰、林美莉和黄晔如等人，也参与了本书的翻译工作。借此机会对以上各位表示诚挚的谢意。顺便还要提到的是翻译工作得以顺利完成，也离不开译者家人的耐心和支持。最后，还要对林宗棠部长在为本手册写的序言中所给予的肯定和赞誉表示敬意。下册翻译工作主要由陆济国先生和本人共同担当。

本手册不仅篇幅多，且涉及金属材料的诸多分支，由于译者水平有限，书中可能存在错误和不足，于此恳请各位读者不吝指正，以便今后再版时得以修订，使之趋于完善，从而更好地为大家服务。

最后，这部手册的最终完成正值清华大学建校百年华诞，直接参与手册翻译、审校和编辑的陆济国、唐波、孔劲以及本人等均为清华学子，我们谨以此书献给亲爱的母校。

《金属手册(案头卷)(上册)》译者　金锡志

附：《ASM手册(ASM HANDBOOK)》卷目

Volume 1，Properties and Selection：Irons，Steels，and High Performance Alloys(性能与选用：铁、钢和高性能合金钢)

Volume 2，Properties and Selection：Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials(性能和选择：非铁合金和特殊用途材料)

Volume 3，Alloy Phase Diagrams(合金相图)

Volume 4，Heat Treating(热处理)
Volume 5，Surface Engineering(表面工程)
Volume 6，Welding，Brazing，and Soldering(焊接和钎焊)
Volume 7，Powder Metal Technologies and Applications(粉末冶金技术及应用)
Volume 8，Mechanical Testing and Evaluation(力学试验和评价)
Volume 9，Metallography and Microstructures(金相和显微组织)
Volume 10，Materials Characterization(金属特性)
Volume 11，Failure Analysis and Prevention(失效分析和预防)
Volume 12，Fractography(断口分析)
Volume 13A，Corrosion：Fundamentals，Testing，and Protection(腐蚀:原理、试验和保护)
Volume 13B，Corrosion：Materials(腐蚀:材料)
Volume 13C，Corrosion：Environments and Industries(腐蚀:环境和工业)
Volume 14A，Metalworking：Bulk Forming(金属加工:实体成形)
Volume 14B，Metalworking：Sheet Forming(金属加工:薄板成形)
Volume 15，Casting(铸造)
Volume 16，Machining(切削)
Volume 17，Nondestructive Evaluation and Quality Control(无损检测和质量控制)
Volume 18，Friction，Lubrication，and Wear Technology(摩擦、润滑和磨损技术)
Volume 19，Fatigue and Fracture(疲劳和断裂)
Volume 20，Materials Selection and Design(材料选用和设计)
Volume 21，Composites(合成材料)
注：括号里的中译名系译者所加。

前　　言

ASM 国际为其手册诞生 75 周年而感到自豪。1923 年美国钢铁处理学会(即后来的美国金属学会,也就是现在的 ASM 国际)出版了一部小型的数据活页集——即大家所知道的《金属手册》的第一个版本。该活页集经过若干年的发展成为多册的参考手册——其每一册都代表一个完整、综合的具有权威性的专题。后又经过不断的扩充，演变成为目前这本冠名为《ASM 手册》的系列图书，它满足了全世界冶金专业不断变化的需要。今年它发展的又一个标志就是《ASM 手册》光盘的出版。

同时，今年又是于 1948 年出版的、已成为经典版本的《金属手册》诞生 50 周年，经整合，它最后编辑为单行本。大约 15 年前出版的第一部《金属手册(案头卷)》也是源自 1948 年的这一版本。现在它的第 2 版也像前两个版本一样，以其简便实用为所有金属工作者提供更多的帮助，是所有金属学优先选择的实用单行本参考用书。

对于 ASM 国际来说，启动增订这本《金属手册(案头卷)》的项目也有些不可思议。其任务之巨似乎是浩瀚的。《ASM 手册》已经增加到目前的 20 卷——差不多是第一版《金属手册(案头卷)》编撰时的两倍。试想要把它从第一个版本诞生时就包含的这么多重要的内容，加上此后多年来又形成的一些最有意义的知识和数据，都归纳在一个单行本里是多么不容易啊!

我们深信这部新的《金属手册(案头卷)》已经超过其预期要达到的目标。这个伟大成就的荣誉应该属于约瑟夫 R. 戴维斯。多年来约瑟夫是《ASM 手册》的编者，他极为渊博的知识加上相当丰富的编辑技巧，使他具有独一无二的资格来完成这本最好的手册。约瑟夫除了个人的努力之外，还组建了一个编写顾问委员会，包括许多 ASM 的朋友们，都对手册作出了不懈的努力，我们也要向他们表示感谢。在此我们还要特别提及有关的 ASM 编辑和工作人员，他们也都为这本手册付出了努力。

当然我们还要特别感谢在过去 75 年中，数以千计的冶金专业人员为这本手册所做出的贡献。正是他们作为作者、校审、编写组织以及手册的编委成员所奉献的知识和经验，才使得这本书有得以出版的可能。也正是由于他们的支持，必将使得《ASM 手册》赢得另一个 75 年。

小爱尔顿 D. 罗米格
ASM(国际)主席

麦格尔 J. 迪海默
ASM(国际)执行经理

序　　言

《金属手册(案头卷)》作为一本综合性的、单行本的参考文献，旨在提供金属及其合金的性质、选用、制造、试验和特征分析的内容。虽然本书的内容主要来自21卷系列的《ASM手册》，但是它却不能被看成是后者的缩写本。相反，《金属手册(案头卷)》更是源自ASM的产品智库——包括其印刷制品和电子版产品，以及其他一些信息资源，如其他出版公司、一些公司的信息部、技术学会及政府机构。

内 容 摘 要

由于最早于1984年出版的这本案头卷所具有的通俗、成功和简便实用，就决定了本手册编写之初就必须遵循与之相同的原则。然而作为第一次修订，我们所面临的挑战是如何从整体上成功地对它进行增删和改进。问题的复杂也在于这次是《ASM手册》自上一次出版以来的又一次完整的编写过程(即包括腐蚀、摩擦学、材料特征分析等其他全新卷本的内容)。为了保证修订后能得到最好的版本，我们成立了一个由12人组成的代表了工业、学术界和研究机构的编辑顾问委员会(其名单列于序言后)，其成员不是对手册做出过关键性的贡献，就是曾经参与过ASM的重要活动。在他们的指导下拟订了编撰大纲，全书分为概论，铁、钢、高性能合金，非铁合金和特殊用途材料，工艺，以及试验、检测和材料的特征分析这五大主要部分。即：

概论　其中包含了3000多条的技术术语，收集了通用性工程表格，金属和非金属的性能比较曲线。它还包括晶粒结构的作用、相图的实际应用、工程设计以及在材料的选用过程中必须考虑的各种因素。

铁、钢、高性能合金　重点在于铁合金和超耐热合金的性质和选用，描述了铁和钢的组织及其性质之间的关系，并分析了现代钢的冶炼工艺对其性质的影响，如经改进的熔化、冶炼方法对超合金性能的影响；还扩充、增加了如经奥氏体回火处理的球墨铸铁、高强度低合金钢、不锈钢(包括双相不锈钢)以及粉末冶金钢的新内容。

非铁合金和特殊用途材料　主要由14个章节组成，介绍了非铁合金及应用于特种用途(如电磁装置、生物医学装置以及先进的航天航空器件)的一些材料的性质及其一般选用方法；还介绍了新近开发的、过去的版本从未有过的关于金属基体复合材料和结构用金属间化合物。

制造工艺　介绍了形成一个零件的全部加工过程，包括冶炼学、铸造、压力成形、热处理、连接、表面清理、抛光和镀层及其回收，增加了关于粉末冶金的全新章节。另外，回收技术的概述也反映了金属工业对于环境保护的关注。

试验、检测和材料的特征分析　除了失效分析、断口分析、无损检测、力学试验、金相学之外，还包括很有实用意义的特征分析方法，如整体元素分析、整体显微组织分析和表面分析的内容。另外，还介绍了有关磨损试验以及对应力-腐蚀裂纹和氢脆评价试验的新信息。

致　　谢

在我们对本书的编者表示感谢之前，首先要感谢其第一个版本的所有编辑人员：迪莫西L.高尔和霍华德E.波尔(很不幸，霍华德已于1990年故世)。迪莫西是这本《金属手册(案头卷)》的原创者。他的远见卓识加上霍华德的极高技艺造就了被一致公认为ASM旗舰的出版事业。

为了以第一个版本为基础，现在的编者召集了许多老朋友和老同事。除了编写顾问委员会之外，第2版还有下列主要编辑人员：肯尼斯 H. 埃格梅尔(桑迪亚国家实验室)是本书“材料特征分析”一章的作者及《高密度金属》一书的合著者，肯尼斯多年来撰写过为数不少的手册条目，同时也是最早的材料特征性能(即1986年出版的《ASM手册》第10卷)的编委会主要成员；乔治 F. 范德·沃尔特(标乐公司)，修改了“金相分析”一章，并编写“断口分析”，乔治在《ASM手册》75年的历史里堪称是一位高产作者，他曾为铁和钢的脆裂机理、光学显微镜在金相和断口分析中的应用，以及用图像分析对微观组织成分进行定量测定做出了权威性的评述；罗得尼 R. 鲍尔(波音民用飞机公司)，修改了“钛和钛合金”一章，并帮助修改全书其他与钛有关的文章，罗得尼还是1994年出版的《材料性质手册》中钛合金一节的主要编著者；汤姆斯 S. 彼温卡(阿拉巴马大学)是“铸造”一章的作者，他还作为分部主任编写了1988年出版的《ASM手册》第15卷铸造；彼得 J. 百劳(橡树岭国家实验室)是“磨损试验”一节的作者，他还是1992年出版的《ASM手册》第18卷摩擦、润滑和磨损技术的编委会主任。

其他知名编写者有哈夫·贝格[ASM(国际)的咨询编辑]，他是“金属的组织和性质”一章的作者，并修改了“镁和镁合金”一章，哈夫从1970年到1979年担任《ASM手册》职员，而且还是1992年出版的《ASM手册》第3卷合金相图的编辑；马苏 J. 道那奇(夏福,伦斯勒)和斯蒂芬 J. 道那奇(特种金属公司)，修改了“超合金”一章，同时马苏还编写了由ASM于1984年出版的《超合金原始资料》，而且他还是《生物材料》一文的著者；艾尔哈德·克拉(美洲OMG,退休)是“粉末冶金”一章的著者，并修改了其他几篇有关粉末冶金的文章，他还是1984年出版的《ASM手册》第7卷粉末冶金一书的协调人。勃拉津德勒·米希拉(科罗拉多矿业学校)，是“钢的冶炼及其对性能的影响”和“金属冶炼”两章的作者。约翰 C. 毕顿斯(威尔希菲尔德　技术工作室)修改了“回收及其循环周期的分析”一章并且协助编写了“成形加工”和“锻造”两章。

我们还要向ASM的同仁们所付出的努力表示感谢。在这里要特别感谢资深的技术编辑斯蒂芬 R. 兰姆浦曼和小爱德华 J. 库伯尔协助完成“失效分析”、“无损检测”和“力学、磨损和腐蚀试验”；还有技术出版部助理主任斯高特 D. 亨利在整个出版过程中所给予的不懈的支持和耐心。当然，ASM资料室的大力协助也应在此诚挚感谢。

正是以上诸位的经验和智慧的综合，才使《金属手册》的精髓得以延续。无论是印刷、光盘和因特网，还是其他值得注意的传媒方式，皆是因为进入到计算机时代才成为了现实；毋庸置疑，我们将把冶金学的传播延续到新的时代中去。最美好的未来正在来临！

约瑟夫 R. 戴维斯
及其同仁
于俄亥俄州 查格林瀑布

编写顾问委员会成员

目 录

第 1 篇　概　　论

第 1 章　术语总汇和工程数据

第 1 节　冶金学术语和金属制造专用术语

本术语总汇收录了约 3500 条常见冶金学术语的定义。收集的术语包括：一般材料科学、物理冶金学、机械冶金学、冶炼冶金学、熔炼与铸造、压力成形与锻造、粉末冶金学、热处理、切削与磨削、焊接与连接(硬钎焊、熔固和粘结连接)、表面工程(表面清洁、光整和涂层技术)、腐蚀与电化学、摩擦学(磨损、摩擦和润滑技术)、断裂力学、力学试验、无损检测、金相学、断口分析学、失效分析和材料特性。这些学科均属于 ASM 21 卷版的系列手册所代表的学科范畴。

本术语总汇还包含了优选的、可替代的且紧密关联的术语间的许多交叉参照，它们都以斜体字表述。而且还列举了在现今的学术论文/报告中已经不用或者不宜使用的一些术语等。许多术语会有不止一个词义，其他的词义均以括号编号依次分列。其中通用或常用的词义排在专用词义之前，但对于一些次要词义则没有照此排序。此外，本术语总汇中的许多定义同 ASTM、AWS、NACE 以及其他一些技术刊物所引用的定义也是相兼容的(尽管不是强求一致)。

本术语总汇不包括一些最好是通过附图来定义的术语，例如焊接形式(如 T 形连接、搭接形连接等)、有关的专门技术用语、刀具的几何角度(如刀具后角、前倾角等)。在本手册中，这类术语是分别在“连接”和“切削”的章节里加以定义，并通过图示予以表达。

虽然已尽了最大的努力以期提供一个尽可能全面的术语总汇，但毕竟篇幅有限，也只能包容一些最常用的术语(为保持原术语的准确性以及排列上的需要，编排上仍以英文术语为主，中文翻译术语置于括号内供读者参考——译者注)。更多的专业词汇刊载于《ASM 手册》系列的术语汇总以及 1992 年出版的《图解 ASM 材料工程词典》里，后者还包括了非金属工程材料的术语及其定义。

A

abrasion(磨料磨损)　(1)一种由硬颗粒或突起在力的作用下沿固体表面运动的过程。(2)因磨料磨损而造成的表面粗糙化或划伤。(3)通过研磨剂进行磨削或造成磨损的过程。

abrasive(磨料)　(1)一种用于磨削、珩磨、研磨、超精研、抛光、喷砂或滚筒光整的硬性物质。常用的研磨剂为刚玉、碳化硅、碳化硼、金刚石、立方体氮化硼、金刚砂和石英砂。(2)硬颗粒也可是岩石、砂砾、某种硬金属的碎屑，它们在压力的作用下与表面发生的相对运动使得表面产生磨损。见 *super-abrasives(超细研磨磨料)*。

abrasive belt(砂带)　一种表面涂覆研磨剂的带状产品，以供生产中的磨削和抛光之用。

abrasive blasting(喷砂法)　一种利用将磨料以很高的速度射向工件表面的方法，以此达到清理或光整的过程。

abrasive disk(研磨盘)　(1)一种安装在钢盘上的磨轮，以其平的侧面进行磨削。(2)一种表面涂覆研磨剂的盘状产品。

abrasive erosion(磨料冲蚀)　因流体所携带的固体颗粒与一固体表面之间沿近似平行方向的相对运动而造成的腐蚀磨损。见 *erosion(冲蚀)*。

abrasive flow machining(磨料流切削)　一种粘性的研磨介质在高压作用下穿过或擦过工件，以此去除其表面的材料。

abrasive jet machining(磨料喷射切削)　由经集束的高速气流所携带的细微研磨颗粒对工件进行强力冲击，以去除其表面材料。

abrasive machining(磨料切削)　将磨粒的尖角作为切削刀具的一种切削过程。磨削就是典型的磨粒切削过程。

abrasive waterjet machining(磨料水力喷射切削)

见 *waterjet/abrasive waterjet machining*（*水力喷射/磨料水力喷射切削*）。

abrasive wear（磨料磨损） 当硬质颗粒在压力下从一表面划过或滚过时，该表面上的材料被磨去。这种颗粒可以是自由颗粒也可以是同被磨损表面相接触的另一个表面的突出部分。比较 *adhesive wear*（*粘着磨损*）。

abrasive wheel（砂轮） 一种由石英砂和粘结剂组成的磨削轮。

absolute density（绝对密度） 见 *density，absolute*（*绝对密度，真密度*）。

Ac_{cm}、Ac_1、Ac_3、Ac_4 通过 *transformation temperature*（*转变温度*）来定义。

accelerated corrosion test（加速腐蚀试验） 一种试验方法，用于在短时间内近似形成通常在长时间的使用条件下才能产生的劣变作用。

accelerated-life test（加速寿命试验） 一种试验方法，用于在短时间内近似形成通常在长时间的使用条件下才能获得的劣变作用。也见 *artificial aging*（*人工时效*）。

accelerated testing（加速试验） 一种针对材料或装置进行的试验，试验产生的失效机理与现场运行中预计发生的相同，但时间大为缩短。通过改变一个或一个以上的试验控制参数来加速失效机理的进程。

acicular ferrite（针状铁素体） 是一种亚表层各向严重不等长的铁素体形态，它是通过一种扩散和剪切相混合的转变模式而形成的，并且这种转变是在稍高于上贝氏体转化的温度范围里开始的。它同贝氏体的明显差别在于有效含碳量非常有限，即只有少量的碳存在。

acicular ferrite steels（针状铁素体钢） 超低的含碳量（$w(C)<0.08\%$）的钢，其显微组织是由针状铁素体（低碳贝氏体），或针状与各向等长铁素体的混合物所构成。

acid （1）（**酸，酸性**）一种溶解在水里会产生氢离子（H^+）的化学物质。比较 *base*（碱）。（2）用于表示炉渣、耐火材料等矿物质中二氧化硅百分比含量很高的种类。

acid bottom and lining（酸性炉底和炉衬） 熔化炉内的炉底和炉衬，由类似砂、硅岩或二氧化硅砖的材料组成，在其工作温度中发生酸性化学反应。

acid copper（酸铜） （1）通过对铜盐溶液（通常为硫酸铜），进行电解得到的铜。（2）即指（1）中的溶液。

acid embrittlement（酸蚀脆性） 由于酸对金属发生作用而引起的一种氢脆形式。

acid rain（酸雨） pH 值低于 5.6～5.7 的大气层降雨。通过燃烧矿物燃料得到热和动力是产生氧化氮和氧化硫的主要原因，氧化氮和氧化硫经雨水淋洗而转变成硝酸和硫酸。见 *atmospheric corrosion*（*大气腐蚀*）。

acid refractory（酸性耐火材料） 具有高熔点的硅酸盐陶瓷材料（如硅石砖），用于冶金炉的内衬。比较 *basic refractories*（*碱性耐火材料*）。

acid steel（酸性钢） 在具有酸性炉底和炉衬的炉子里，且在含有过量的酸性物质（如二氧化硅）的炉渣中进行熔炼的钢。

acoustic emission（声发射） 一种材料完整性测量方法，给材料加载并通过声发射进行测定。从理论上说，这种发射与材料的缺陷和（或）早期失效有关。

actinide metals（锕系金属） 周期表中原子序数从 89 到 103 的放射性元素——即锕、钍、镤、铀、镎、钚、镅、锔、锫、锎、锿、镄、钔、锘和铹。

activated rosin flux（活性树脂钎焊剂） 含有添加剂的树脂基焊剂，借助焊料可提高其润湿性。

activation（活性） （1）钝态的金属表面变为化学活性的状态。对照*钝化*（*passivation*）。（2）一种使表面变得更容易与涂层或封装材料相粘结的（常规）化学过程。

activation energy（活化能） 激活一种冶金反应所需要的能量——例如塑性流、扩散、化学反应。活化能可以由其反应速率的自然对数相对于热力学温度倒数所画出的直线的斜率计算得出。

active（活性） 指的是一种因相对负电极电位而引起的易腐蚀趋势。也当电极的电位低于其周边低腐蚀率里的电位时用于形容腐蚀及其相关的电位范围。

active metal（活性金属） 易于腐蚀或被腐蚀的金属。

activity（活度） 对于物质化学势能的度量，此化学势能并不等于其浓度，它只是形成与理想系统相当的数学关系，从而利用该系统将实验的测量值变化与化学势能变化进行关联。

addition agent（添加剂） （1）一种加入溶液里旨在改变或控制某种过程的物质。例如，酸洗液里的润湿剂、电镀溶液里的光亮剂和抗点蚀剂，以及防腐剂。（2）添加于熔炼池或钢液包里的金属熔化炉料中的物料，以使合金达到规定的技术指标。

adhesion（粘附） （1）处于摩擦接触的表面之间的吸附力。在物理化学中，粘着表示的是固体表面与其第二相（液相或固相）之间的吸附。这个定义是基

于一种可逆性平衡的假设。而在机械工程中，粘附一般是不可逆的。铁路工程中，粘着则常常意味着摩擦。(2)两种不同的物相的分子(或原子)之间的吸附力，对照 *cohesion (粘合)*。(3)指两个表面借助于它们之间的界面力结合在一起的状态，这种界面力由化合价力、联锁作用或二者兼而有之组成。

adhesive(粘附剂) 能通过表面的粘结将两种材料结合在一起的物质。粘结剂是其常用术语，其中包括水泥、骨胶、胶水和糨糊。

adhesive bonding(粘附连接) 材料的连接过程，将粘附剂涂于紧密接触的(被粘物)表面之间，并通过固化形成一种粘附结合。

adhesive wear(粘着磨损) (1)表面间因发生固相焊合，而使材料在相对运动的过程中从一个表面上转移到另一个表面上所形成的一种磨损。从一个表面脱落下来的颗粒可以永久性或临时性地粘附在另一表面上。(2)由于相接触的固体表面之间的局部连接，而导致材料在表面之间的转移或从其表面失落而形成的磨损。比较 *abrasive wear (磨料磨损)*。

adjustable bed(可调床身) 模具的闭合高度便于改变的压力机的床身。

Ae_{cm}、Ae_1、Ae_3、Ae_4 通过 *transformation temperature (转变温度)* 来定义。

age hardening(时效硬化) 通常是在速冷或冷冻处理之后，通过时效(热处理)使材料变硬。

age softening(时效软化) 某些经应变硬化的合金特别是铝合金，其强度和硬度在室温条件下发生的自然衰减。

aging(老化,时效处理) (1)将材料长时间暴露于自然环境中所获得的效果。(2)为了预测材料的使用寿命，长时间地将其暴露于自然环境中的过程。

aging heat treatment(时效热处理) 经过热变形加工，或热处理(铁合金的淬火热处理或铁和非铁合金的自然时效或人工时效)，或冷冻处理(应变时效)后的某些金属和合金通过环境温度或适度升高温度的处理使其性质得到改变。这种改变往往是(但并不总是)由于相变(相沉积)引起的，然而这种金属或合金绝不会有化学成分上的变化。也见 *age hardening (时效硬化)*，*artificial aging (人工时效)*，*interrupted aging (间断时效)*，*natural aging (自然时效)*，*overaging (过度时效)*，*precipitation hardening (析出硬化)*，*precipitation heat treatment (析出热处理)*，*progressive aging (顺序时效)*，*quench aging (淬火时效)*，*step aging (分步时效)* 和 *strain aging (应变时效)*。

air acetylene welding(空气乙炔焊) 一种燃料气体的焊接工艺，其连接是通过气体火焰或将乙炔在空气中燃烧得到火焰的加热方法来实现的。它不使用压力，但金属填料的使用可视情况而定。

air bend die(悬空弯曲模) 角度成形模，金属成形时，在其模底不发生撞击。金属在压模的横截面上只有三点发生接触：即阳模的突出部和V形模敞开处的两边。

air bending(自由弯曲) 在弯曲冲模中进行弯曲。

air carbon arc cutting(空气碳电弧切割) 一种电弧切割工艺。被切割的金属是利用碳弧加热进行熔化的，而熔化了的金属又是用空气吹掉的。

air classification(气流分级) 利用速度可控的气流将金属粉末按颗粒大小进行分级。也是一种气体淘析原理的应用。

air-hardening steel(空气淬火钢、气冷硬化钢) 将有足够碳和其他合金元素含量的钢加热到其相变温度以上，然后完全在空气或其他气体介质中进行冷却，以此得到的淬火钢。它仅指能通过空气进行冷却淬火的钢，其截面积也相当大，直径为50mm(2in)甚至更大。同 *self hardening steel (自淬火钢)*。

air-lift hammer(气提重力锤) 一种重力落锤，其锤头每一次行程的提升都是通过气缸实现的。因为行程的长度是可以控制的，所以锤头的速度以及作用于工件上的能量也是可变的。也见 *drop hammer (落锤)* 和 *gravity hammer (重力锤)*。

alclad(包铝件,镀铝件) 精制的复合型压制产品，它是由铝合金的心部与其单面或双面用冶金方式粘结的铝或铝合金涂层表面所构成的，该涂层相对心部为阳极，故作为电化学的保护而使其不受腐蚀。

alkali metal(碱金属) 周期表里IA组中的金属，即锂、钠、钾、铷、铯和钫。它们能形成很强的氢氧化碱，故由此得名。

alkaline cleaner(碱性清洗剂) 一种氢氧化碱和碱性盐类，如硼酸盐、碳酸盐、磷酸盐或硅酸盐的调和物，可通过添加表面活性剂和特殊溶液增强其清洗作用。

alkaline earth metal(碱土金属) 周期表中的IIA组金属，即铍、镁、钙、锶、钡和镭。之所以如此命名，是因为钙、锶和钡的氧化物或“土”都是被早期的化学家在反应中作为碱发现的。

alligatoring(鳄纹开裂) (1)在整个涂层表面上有着明显的类似鳄鱼皮的长裂口。(2)板坯表面上沿辊轧方向的纵向裂口，也称为鱼纹开裂。

alligator skin(鳄鱼皮) 见 *orange peel (橘皮表面)*。

allotriomorphic crystal(异形晶体) 一种正常的晶体的晶格结构，但其外表面却是不规则的晶面，而且该外表面有由于其他晶体或另外的表面(如模壁)的接触所留下的压痕，或因为不均匀的生长而形成的不规则形状。比较 *idiomorphic crystal(自形[整形]晶体)*。

allotropy(同素异形) (1)*polymorphism*(同素异相)的近义词。同素异形一般限于指元素、终极相位和合金的各向异性的特征，其中作为合金的这种特性与其最主要的组分元素的特性极为相似。(2)存在着一种具有两种或两种以上的物理状态的物质，特别是作为一种元素(如晶体)。

allowance(公差) (1)极限大小的规定差值(配合零件之间的最小间隙或最大过盈)，根据各个零件的规定尺寸和公差的算数运算得出。(2)铸造翻砂中规定的间隙。见 *tolerance(公差)*。

alloy(合金) (1)具有金属特性，并且由两种或两种以上的化学元素组成，其中至少有一种为金属。(2)一种合金的熔化或提炼。

alloy cast iron(合金铸铁) 合金成分含量(质量分数)超过3%的高合金铸铁。合金铸铁的种类可以有白口铸铁、灰铸铁和球墨铸铁。

alloying element(合金元素) 加入并保持在金属里，用于改变其结构和性质的元素。

alloy plating(合金镀覆) 两种或两种以上的金属元素的共沉积。

alloy powder, alloyed powder(合金粉末) 至少由两种成分构成的金属粉末，其成分能部分或全部地熔和在一起。

alloy steel(合金钢) 含有规定含量的合金元素的钢(合金元素不包括碳以及通常许可含量的镁、铜、硅、硫和磷)，其含量处于足以使之成为结构合金钢的范围之内，从而赋予其力学和物理性能的变化。

alloy system(合金系统) 由至少有一种为金属的任意两种或两种以上的组分，以所有各种比例混合而形成的全系列合金。

all-weld-metal test specimen(全焊接金属试件) 全部由金属焊接构成的试验样件。

alpha brass(α黄铜) 铜与一种或多种合金元素组成的固溶体，其晶体的晶格与铜相同。

alpha ferrite(α铁素体) 见 *ferrite(铁素体)*。

alpha iron(α铁) 纯铁的体心立方形式，在910℃(1670℉)以下稳定。

alternate immersion test(交替浸蚀试验) 将试件按规定的时间间隔间断地浸入某种液体介质里进行的腐蚀试验。

aluminizing(镀铝) 通过热浸、热喷或扩散的方式将铝或铝合金涂覆于金属表面。

amalgam(汞银合金) 用汞与银、锡、铜，有时还有锌的合金颗粒，结合在一起制成的一种补齿合金。

amorphous(非晶体的) 没有晶体结构，即非晶态的。

amorphous solid(非晶固体) 一种刚性材料，其结构缺少晶体的周期性，即构成其形态的原子或分子不会在三维方向上呈现出周期性的重复。见 *metallic glass(金属玻璃)*。

anelastic deformation(滞弹变形) 在载荷的作用下，物体产生的总体变形中的任何一部分都是时间的函数；当载荷撤消，并经过一段时间后，变形会完全消除。

anelasticity(滞弹性) 固体的性质，正是由于这种性质，才使得在无永久变形的低应力范围里的应变不会成为应力的单值函数。

angle of bite(咬入角) 在轧制金属时，通过轧辊传递全部作用力的位置；在起始接触的轧辊半径与轧辊中心连线之间所能达到的最大夹角。小于咬人角的工作角称为接触角或辊轧角。

angle of nip(剪切角) 辊轧中的夹住角。对于轧辊、颚形夹爪或回旋粉碎机来说，就是由工作表面之间的两个接触点上的切线所构成的进入角，(假定)球形颗粒因此而被碾碎。

angstrom(unit) **(埃(Å),单位)**。线度单位，等于 10^{-10}m 或0.1nm(纳米)，常用于表示很小的距离，例如原子间距离及一些波长。

anion(阴离子) 带负电荷的离子，在电动势梯度的作用下它通过电解质向阳极移动。见 *cation(阳离子)* 和 *ion(离子)*。

anisotropy(各向异性) 材料在其内部设定的参考系统里的不同方向上呈现出的不同特征值的性质。

annealing(退火) 指一种常用的热处理，包括将材料加热并维持在一适当的温度，然后以适当的速度冷却，主要用于软化金属材料，同时也使之产生其他性能或显微组织所需要的变化。这种变化的目的在于，但不仅限于切削性能的改善、冷变形加工容易程度的提高、力学和电学性能的改善以及(或)其尺寸稳定性的提高。当不受限定地使用这个词时，其意思是完全退火。当它仅被用于消除应力时，其处理过程也就更多地被称为消除应力或消除应力退火。

铁合金的退火往往在其相变以上的温度进行，但是在采取的退火工艺中，所达到的最高温度和所采用的冷却速度都可以在很大的范围里变动，它们取决于成分、材料状态和所需要的结果。在实际应用中，会用到以下工业用名称：黑色退火、蓝色退火、装箱退火、光亮退火、火焰退火、完全退火、石墨化、加工过程中退火、等温退火、可锻化、定向退火、过程退火、淬火退火、球化处理、亚相变退火。

对于非铁合金，退火程序制定成：①部分或全部消除冷变形加工的影响(重结晶是否包括在内可视情况而定)；②把比较粗糙的固溶体充分地转变为完全聚合的沉积物；③以上两者兼而有之，取决于成分和材料的状态。工业上常用的规定名称为最终退火、完全退火、中间退火、重结晶退火、消除应力退火、回火后退火。

annealing carbon(退火碳)　见 *temper carbon(回火碳)*。

annealing twin(退火孪晶)　在重结晶的过程中形成的一种孪生晶体。

anneal to temper(回火后退火)　一种最终的局部退火，将经冷变形加工的非铁合金软化到规定的硬度或抗拉强度。

anode(阳极)　(1)电解槽中能起氧化作用的电极，在其外接的回路里电子从阳极离开。通常正是在该电极发生腐蚀，且金属离子也由此进入溶液。(2)电化学回路里的正极(电子亏缺)。对照 *cathode(阴极)*。

anode copper(阳极铜)　通过粗铜在反射炉里精炼得到的一种特殊形状的铜锭，它在电解精炼中作为阳极使用。

anode effect(阳极效应)　在电解中，因阳极的极化而产生的效应。它以电压的突然升高以及电流的相应减少来表征，后者是因为阳极在电解过程中逐渐被气膜所分隔开来而造成的。

anode efficiency(阳极效率)　阳极的电流效率。

anode film(阳极膜)　(1)溶液同阳极直接接触的部分，特别是当浓度的梯度陡降时。(2)阳极自身外层。

anode polarization(阳极极化)　见 *polarization(极化)*。

anodic cleaning(阳极清洗)　以工件作为阳极的电解清洗。也称为反向电流清洗。

anodic coating(阳极涂层)　通过阳极的电解处理在金属表面形成的一层膜。

anodic pickling(阳极酸洗)　以工件作为阳极的电解酸洗。

anodic polarization(阳极极化)　由于电流的作用，电极势能向惰性(正向)方向变化。见 *polarization(极化)*。

anodic protection(阳极保护)　(1)一种通过使金属向惰性，即溶解率较低的区域极化，并以此降低腐蚀速率的技术。(2)加上一外电压，以保护金属不受腐蚀(仅用于表现为有效惰性的金属)。对照 *cathodic protection(阴极保护)*。

anodic reaction(阳极反应)　相当于正电荷从电子导体向离子导体转移的电极反应。阳极反应也就是氧化过程。常见的腐蚀例子有：$M(s) \rightarrow M(aq)^{2+} + 2e^-$。

anodizing(阳极化)　通过阳极氧化在金属表面形成一种转化涂层，大部分用于铝。

anolyte(阳极液)　电解槽中阳极附近的电解液。

antiferromagnetic material(抗铁磁性材料)　一种依靠原子间的作用力使固体中的原子磁元体(电子自旋)保持对齐的材料。其状态与铁磁材料类似，但不同的是有相同数量的磁元体(自旋)面向相反方向并呈反向平行，以致该固体呈现出弱磁性，即顺磁性，而不是铁磁性。

antifriction material(抗摩材料)　一种有着低摩擦或自润滑性质的材料。

antipitting agent(抗点蚀剂)　一种用于电镀液的添加剂以防止形成点蚀或在电沉积上的大空穴。

anvil(砧座)　大而重的金属块，用以支撑框架结构，并能夹持锻锤的固定模。也是用来在上面锻打锻件的金属镦子。

anvil cap(砧顶)　同 *sow block(模具夹持器)*。

apparent density(表观密度)　(1)粉末的单位体积重量，与单个颗粒的单位体积重量相对照。(2)疏松固体的单位体积重量，单位体积是由其外形尺寸确定的。表观密度总是小于其材料本身的实际密度。

Ar_{cm}，Ar_1，Ar_3，Ar_4，Ar'，Ar''　定义为相变温度之下的温度。

arbor　(1)(**心轴**)砂轮机上安装砂轮的心轴。(2)切削机床上夹持并驱动刀具的主轴或刀杆。(3)(**芯骨**)在铸造造型中，插在湿砂或干砂芯里的金属芯骨，以此支撑砂子或承受浇注时的作用载荷。

arbor press(手板压力机)　一种压力机，用于将主轴或心轴压入经过钻孔或镗孔的零件，为车削或磨削进行准备。还可用于将套、轴或销压入孔中或压出孔。

arbor-type cutter(套式铣刀)　一种带有轴孔并可安装在心轴上使用的刀具，通常还有键槽与驱动键

相配。

arc(电弧) 电流通过两个电极之间的间隙进行的发光放电。

arc blow(偏弧) 在磁力的作用下，电弧从其正常的路径发生偏斜。

arc brazing(电弧硬钎焊) 利用电弧的热量进行的硬钎焊工艺。

arc cutting(电弧切割) 利用电极与基体金属之间的电弧产生的热熔化被切割金属的一类工艺。见 *carbon arc cutting(碳弧切割)*、*metal arc cutting(金属电弧切割)*、*gas metal arc cutting(气体金属电弧切割)*、*gas tungsten arc cutting(气体保护钨极电弧切割)*、*plasma arc cutting(等离子电弧切割)*和 *air carbon arc cutting(空气碳电弧切割)*。比较 *oxygen arc cutting(氧弧切割)*。

arc furnace(电弧炉) 一种直接利用电极与工件之间的电弧或间接利用与金属相邻的两个电极之间的电弧熔化金属的炉子。

arc gouging(电弧刨) 一种电弧切削工艺变形，用来加工各种斜面或沟槽。

arc melting(电弧熔化) 在电弧炉中熔化金属。

arc oxygen cutting(氧弧切割) 参见 *oxygen arc cutting(氧弧切割)*。

arc plasma(等离子电弧) 见 *plasma arc cutting(等离子电弧切割)*。

arc seam weld(电弧焊缝焊) 利用电弧焊工艺焊成的缝焊。

arc spot weld(电弧点焊焊点) 利用电弧焊工艺焊成的点焊焊点。

arc spraying(电弧喷涂,ASP) 利用在两个以表面材料为自耗电极之间的电弧作为热源的热喷涂工艺，同时通过压缩空气将上述表面材料雾化喷涂在底金属上。

arc strike(电弧触发,起弧) 一种间断性放电，其发生在包括任何局部重熔金属、热效应金属，或因电弧造成焊缝或基体金属上任何部分的表面轮廓变化之处。

arc welding(电弧焊) 通过电弧加热将金属连接在一起的一类工艺，压力、金属填料的使用视情况而定。

arc welding electrode(电弧焊焊条) 见 *electrode (welding)(焊接用焊条)*。

argon oxygen decarburization(氩氧脱碳法,AOD) 在钢的冶炼中采用的一种受控碳氧化的二次精炼工艺。在AOD中，通过浸没的、侧置的喷口将氧、氩和氮注入熔化金属槽里。

artifact(人为现象) 一种人为特征，例如在金相试件上的一划痕或一颗灰尘，常被误以为是真实特征。

artificial aging(人工时效) 在室温之上进行时效处理。见 *aging heat treatment(时效热处理)*，比较 *natural aging(自然时效)*。

as-cast condition(铸态) 从铸模里取出的铸件状态，未经后续热处理。

as-welded(焊态) 焊接金属、焊接接头和焊接件经过焊接之后的状态，但未经任何热、机加工或化学的后续处理。

athermal transformation(无热转变) 一种未曾受益于热态变动的反应过程——也就是无需热作用。这样的反应是没有扩散过程的，并且其反应在足够高的驱动力作用下能以很高的速度进行。例如，许多的马氏体转变是在冷却、甚至是相当低温度的无热条件下发生的，因为其反应的驱动力是逐渐增加的。与此对应的等温转变是发生在温度不变条件下的一种反应，在这种情况下，热量作用是必要的，而且反应的进行是以时间为函数的。

atmospheric corrosion(大气腐蚀) 材料通过与存在于大气中的某些物质(如氧、二氧化碳、水蒸气以及硫和氯的化合物)的接触而逐渐发生的劣变或转变。

atmospheric riser(增压冒口,威廉氏冒口) 利用大气压帮助充填金属的一种冒口。在原本的暗冒口中插入一个小的型芯或芯棒，其功能就是提供一条开放通道，当金属从冒口流入铸件进行补给时，冒口内的熔化金属就不会处于一种部分真空状态而总是处于大气压力之下。

atomic number(Z)(原子序数) 原子核中的质子数。它决定了作为化学元素的原子所特有的性质。

atomic percent(原子百分数) 在某种物质100个有代表性的原子中，包含某一种元素的原子数量。

atomization(雾化作用) 以快速气流、液流或其他方法将熔化的金属分散成微小的颗粒。

attritious wear(磨料磨损) 磨削过程中，磨削颗粒被磨损以致颗粒锐棱变圆，经受这种磨损的砂轮有一种被抛光的外观。

attritor(碾磨机) 一种高强度的球磨机，其磨鼓为静止的，而其磨球则由旋转隔板、叶片或圆杆以同磨鼓轴线呈直角的方向进行搅拌。

attritor grinding(碾磨磨削) 在碾磨机上进行的强力磨削或合金机械熔合。例如碳化物、粘结剂金

属粉以及硬分散胶体颗粒与软金属或合金粉末的机械合金化的研磨。也见 *mechanical alloying*（*机械合金化*）。

Auger electron（俄歇电子）　从内层有缺位的原子中发射出来的电子。俄歇电子具有一种在所产生的二次电子能谱中被检测为峰值的特征能量。

Auger electron spectroscopy（俄歇电子能谱学，AES）　一种表层化学分析的技术，通过测量它们的俄歇电子的特征能量鉴别表层中所存在的原子。

ausforming（奥氏体形变）　在低于重结晶温度下，作为亚稳态奥氏体状态钢的形变热处理，再经过淬火可得到马氏体或贝氏体。

austempered ductile iron（奥氏体回火球墨铸铁，ADI）　中度合金熔合的球墨铸铁，它经过奥氏体回火能够得到较高强度及适度的塑性。也见 *austempering*（*奥氏体回火*）。

austempering（奥氏体回火）　一种铁合金的热处理方法，即零件为避免生成铁素体和珠光体而以奥氏体温度和足够快的速度进行淬火，然后保持在略高于 *Ms* 的温度里，直至完全转变为贝氏体。虽然奥氏体回火钢和奥氏体回火球墨铸铁（ADI）都称为贝氏体，但是奥氏体回火钢是由包含铁素体和碳化物的两相混合物所组成，而奥氏体回火球墨铸铁是由铁素体和奥氏体的两相混合物所组成。

austenite（奥氏体）　面心立方铁（γ 铁）的一种或多种元素的固溶体。除非另有所指（如镍奥氏体），否则其溶质一般都指的是碳。

austenitic grain size（奥氏体晶粒大小）　就是当钢被加热到奥氏体区域时晶粒的大小。冷却到室温后，通过对其横截面进行适度的腐蚀可以看到。

austenitic manganese steel（奥氏体锰钢）　包含大约 $w(C)$ 为 1.2% 的碳和 $w(Mn)$ 为 12% 的锰的抗磨材料。主要应用于运土、矿山、采石、铺铁路、矿石处理、伐木以及水泥和粘土制品的制造方面。也就是所谓的高锰钢。

austenitic steel（奥氏体钢）　一种在室温下呈正火奥氏体组织的合金钢。

austenitizing（奥氏体化）　通过将铁合金加热到相变温度范围（部分奥氏体化）或高于相变温度范围（全部奥氏体化）而生成奥氏体的过程。该词汇如使用中无限定条件，则是指完全奥氏体化。

autogenous weld（乙炔气焊）　一种不加金属焊料的熔焊。

automatic press（自动压力机）　一种其工件用机械手，以与压制动作同步的方式送入进行压制的压力机。此外，自动化压力机则是一种内置电气和气动控制装置的自动压力机。

automatic welding（自动焊）　一种焊接工艺，其所用焊接设备的焊接作业不需要操作人员进行操控。该设备是否自行送料可视情况而定。对照 *machine welding*（*机焊*）。

auxiliary anode（辅助阳极）　在电镀中，设置一补充阳极，以便在一定的阴极区域提高其电流密度，从而得到更好的镀层分布。

auxiliary electrode（辅助电极）　一种常用于极化研究中的电极，即研究将电流从试验电极中输入或输出。通常它使用抗腐蚀材料制成。

axial roll（轴向辊子）　在圆环辗碾过程中，在一个可置换的水平机架里安装着垂直可更换的且带有锥度的辊子，机架与主轧辊及辊轴相对安置，并处于同一中轴线上。在辗碾时，这些轴向辊子控制环的高度。

B

Babbitt metal（巴氏合金）　1839 年由伊萨克·巴比特提出来的一种非铁轴承合金。现在该术语代表若干种锡基合金，主要是其中含有不同量的铜、锑、锡和铅。铅基巴氏合金也有使用。

back draft（倒锥度）　铸造模型或锻造模中的倒置锥形体，以防止铸造模型或锻造毛坯在空腔内发生移动。

backfire（瞬间回火）　火焰瞬间从焊枪的焊嘴或割枪嘴倒回进去，紧接着火焰又重新出现或者完全熄灭。也见 *flashback*（*回火*）。

back gouging（背面割槽）　从已经部分焊接的另一面将焊缝金属和基体金属刨去，以便在其上面再焊时能完全熔化和完全焊透。

backing　（1）（**垫料**）。打磨时用以粘结磨粒的材料（纸、布或纤维）。（2）（**垫料**）。焊接时垫衬在焊缝下面或背后的材料，用以提高其根部的焊缝质量，它可以是金属的封环或封带，金属的封底焊道，或是非金属如碳、粒状焊剂或一种保护气体。（3）（**衬背**）。在滑动轴承中粘贴轴承合金的轴承零件，正常情况下都是用金属粘结剂粘结。

backoff（退刀）　砂轮或切削刀具从其与工件的接触点的快速退离。

backward extrusion（反向挤压加工）　同 *indirect extrusion*（*间接挤压加工*），见 *extrusion*（*挤压加工*）。

bainite（贝氏体）　在珠光体温度范围以下，马氏体开始生成的温度 *Ms* 之上，由奥氏体转变为铁素体

和渗碳体的亚稳态聚合体。贝氏体的上部是一种包含铁素体的平行板条形组合的聚合体，在光学显微镜下呈现为“羽毛状”的图像，是在大约350℃(660℉)以上的温度里形成。贝氏体的下部呈针状，类似于回火马氏体，形成于大约350℃(660℉)的温度里。

bainitic hardening(贝氏体硬化) 主要导致贝氏体形成的淬火硬化处理。

Bakelite(胶木) 酚醛热压树脂的一个专用名称，用作金相样品的镶嵌材料。

baking(烘干) (1)低温加热以去除气体。(2)固化或硬化表面涂层如对油漆进行热烘烤。(3)加热去湿，如砂芯在制模后进行烘干。

ball burnishing(球磨打光) (1)同 *ball sizing*(球光整)。(2)通过与金属球一起翻滚，给小的冲压件和机加工件去毛刺。

ball mill(球磨机) 一种用于将已粉碎的矿石或其他物质(如颜料或陶瓷)磨成粉末的机器，由在一个旋转的中空圆柱体内装进部分的金属球(通常为淬硬的钢或白口铸铁)或用鹅卵石构成。

ball milling(球磨) 一种碾磨和混合材料的方法，在一个放置了部分碾磨介质(如金属球或卵石)的旋转圆柱体或棱柱体中进行，是否用液体可视情况而定。

ball sizing(球光整) 将一个大小适当、表面粗糙度低和硬的球用力压过一个孔，或者就用一根压光杆或由一系列直径逐渐增大的球面串在一起所组成的拉刀对孔进行光整加工。这也叫球压光整或球形拉刀光整。

banded structure(带状组织) 一种由不同成分呈近似平行带状交替构成的偏析组织，一般都沿热变形加工的主方向取向。

banding(带状化) 合金元素和相的不均匀分布，并且是沿着与加工相平行的方向呈针状或片状地分布。也见 *banded structure(带状组织)*、*ferrite-pearlite banding(铁素体-珠光体带)*和 *segregation banding(偏析带)*。

band mark(带状压痕) 由于外部压力作用在缠绕在定长中厚板或卷材上的绑带上，以致在碳钢薄板或带钢上留下的一种压痕。它是在搬运、运输和储存的过程中产生的。

bands(带材、扁钢) 热轧带钢，通常用于轧制成更薄的薄板或带材。即众所周知的热轧扁钢或扁钢。

bar(棒材) (1)方钢坯料通过热轧成为各种形状的截面，如圆、六角、八角、方形或矩形，并带有锐角或圆角(边)，其横截面积小于105cm²(16in²)。(2)实心型材且其长度的尺寸远大于其横截面的尺寸，而且具有完全对称的横截面，其宽度或平行表面之间的最大距离为9.5mm(3/8in)或更长一些。(3)一种已不太使用的压力的单位，1bar(巴)=100kPa。

bare electrode(裸焊条、无药焊条) 一种作为金属填料的焊条，由单一金属或合金组成，可以制成线、带或棒等形式，应用时不需要涂层或覆盖层，该焊条不像某些焊条在制造和保存时都要伴之以涂层或覆盖层。

bar folder(棒式折边机) 一种利用折弯棒或翼板对金属薄板进行弯曲的机器，先将金属板料的边缘夹持在上面的折板和下面不动的颚板之间，再沿其边缘把金属板弯曲成窄的、带锐角的、闭合的和精密的折弯件。它还能用于制造绕线用的圆筒形折弯件。还有一种万能型的折弯机，其通用性更强，惟一受限制就是薄板的宽度尺寸。

Barkhausen effect(巴克豪生效应) 当改变作用于铁磁体试件的磁化力时，磁感应强度发生的阶跃。

barrel cleaning(滚筒清洗) 金属在旋转设备中的机械清洗或电解清洗。

barrel finishing(滚筒精整加工) 通过将工件与悬浮在液体中的磨粒一起在旋转的设备里进行处理，来降低工件的表面粗糙度。通常桶装约60%的零件、介质、混合物和水。

barreling(成为鼓形) 在圆柱体或圆锥体在镦粗的过程中，其柱形表面常形成鼓形度，犹如压缩试验中自然而成的结果。

***barrel plating*(滚筒镀)** 在旋转容器中对物件进行镀层，其容器是一个多孔的圆柱体，并且运行时至少有一部分浸没在溶液里。

barstock(棒材) 同 *bar(棒材)*。

base (1)(**碱**)。当溶于水时会产生氢氧根离子(OH^-)的化学物质。比较 *acid(酸)*。(2)(**刀台基面**)。当单刃切削刀具夹持在刀架上时，刀架上被放置的表面。(3)(**基座**)。用于锻造，见 *anvil(砧座)*。

base metal (1)(**基体金属**)。在合金中占比例最多的金属，如黄铜是铜基合金。(2)(**母体**)。要被进行硬钎焊、切割、软钎焊或电焊的金属。(3)(**底层金属**)。焊接之后，金属中未曾熔化的部分。(4)(**活性金属**)容易氧化或溶解成为离子的金属。对照 *noble metal(惰性金属)*(2)。

basic bottom and lining(碱性炉底和炉衬) 熔化炉内的炉底和炉衬，由经粉碎和烧结的白云石、菱镁矿、镁砖或碱性炉渣材料组成，这些材料在炉子的工作温度下会发生碱性反应。

basic oxygen furnace(碱性氧气炉) 大型、可倾式的转炉，这是一种用于现代炼钢的炼钢炉，其炉衬为碱性耐熔材料，当炉里加入熔化了的生铁(通常包含所装炉料的65%~75%)、废钢、助熔剂等材料之后，引入一根接近熔化金属表面的喷管并以一束高压氧气流吹向金属。氧气与碳以及钢中其他杂质发生反应，生成一种能溶于矿渣的液态化合物和能从炉顶逃逸的气体。

basic refractories(碱性耐火材料) 耐火材料的主要组分为石灰、氧化镁或两者都有，它能与酸性耐火材料、酸性炉渣、或酸性助熔剂在高温下发生反应。碱性耐火材料用于做炉衬。比较 *acid refractory (酸性耐火材料)*。

basic steel(碱性钢) 即在炉底和炉衬为碱性的炉子里熔炼的钢，其钢液处于包含着过量的碱性物质(如石灰、氧化镁)的炉渣之下。

basic metal(碱性金属) 参见 *substrate (涂层基体)*。

batch(批货) 采用相同工艺或在同一条连续生产线上生产的，且始终有一致性特征的批量材料。也见 *lot (批量)*。

batch furnace(炉次) 一个炉次指的是炉里一次所装载的热处理物料。对于大型零件，如重型锻件，标明其炉次是必要的，对于需要较长处理周期的复杂合金牌号来说，最好也这样做。

Bauschinger effect(包辛格效应) 沿塑性流动方向发生的塑性变形能提高其屈服强度，而沿其他方向则会使其降低的现象。

bauxite(铝土矿) 一种灰白至浅红色的矿石。主要为氧化铝的水合物，其成分为 $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$。它是铝、刚玉磨粒和铝基耐火材料的最重要矿石(来源)。

Bayer process(拜尔工艺) 在电解提炼之前，从铝土矿中萃取氧化铝的方法。用氢氧化钠溶液浸提铝土矿，将氧化铝转化为可溶性的铝酸盐。把“红泥”状的残余物滤去以后，使氢氧化铝沉淀、过滤，并经焙烧成为氧化铝。

beach marks(沙滩纹路) 出现在疲劳断裂表面或应力腐蚀的裂纹表面上的宏观的连续纹路，显示一种裂纹扩张前沿的递次位置。典型的形状是从一个或多个源点由里向外扩散的不规则的椭圆或半椭圆环。沙滩纹路(即所谓的蛤壳纹路或刹车纹路)是零件在工作中承受随机性的、间断性的或周期性变化的均衡或交变的应力所产生的裂纹上可以发现的一种典型纹路。也见 *striation (条纹)*。

bead (1)(**半圆形凹痕**)。在模具里的半圆形的凹坑，或铸件表面上的半圆形凸起或压痕。(2)(**焊珠**)。焊接金属因为熔化而造成的个别堆积。

beaded flange(球形凸缘) 一种稍有些隆起的加强性凸缘，大部分用于孔的周围。

beading(压凸缘) 在薄板上压出的波峰或凸起。

bead weld(凸焊) 参见 *surface weld (堆焊)*。

bearing strength(支承强度) 所能承受的最大支承应力。也是应力—应变曲线在该点上的支承应力，该处的正切等于其支承应力除以支承孔直径的 $n\%$。

bearing stress(支承应力) 在机械连接点上的剪切载荷(如销或铆钉联接)除以有效支承面积。例如铆接的有效支承面积为所有的铆钉直径之和乘以承载件的厚度。

bearing test(承载试验) 薄板产品在采用铆接、螺钉连接或类似的连接方法固定时，测试其对应力(载荷)反响的方法。试验的目的是为了确定材料的支承强度，并测量因销或螺杆造成孔变形的应力，销或螺杆的圆截面穿过薄板并与其表面相垂直。

bed (1)(**基座**)。通常指坐落于地面或基础上的压力结构的静止部分，以此支承其他零件的压力及载荷压力。垫块、下模(有时)安装在基座的顶面上。(2)(**床身**)。指机床的主机座部分，用以支持其上面的刀具、工件或其两者。(3)(**机身**)。指剪床机座的静止部分，用以支持被剪的材料和固定刀板。

Beilby layer(贝尔俾层,热熔层) 因为加工、磨损或机械抛光而在金属里形成的一种扰动层，并认为其不再保持规则的晶体结构(无定形)及原有的晶粒边界。

belt furnace(带式炉) 一种连续式的炉子，利用网带式或链板输送带携带零件通过炉子。

belt grinding(砂带) 用于打磨的砂布带。

bench molding(手工造型) 通过手工捣实翻砂造型，或在台架上不借助气动或液压进行造型。

bend allowance(折弯系数) 在弯曲件的中轴弧线上，两弯曲切点间的弧线长度。

bend angle(弯曲角) 在弯曲的过程中所形成的角度，即其补角是由两条切线或两个切平面相交而成。

bending(弯曲) 材料的弯曲变形，通常是指使平薄

板或带形金属围绕处于其中心平面里一条直线的运动，并且在金属塑性范围内产生金属流动，故作用应变撤去后，弯曲零件将保持永久性的残余变形。在其弯曲横截面上，中心平面内侧部分受压缩，而其余部分受拉伸。

bending brake(弯曲成形机) 一种开式机架、单动型的压力机，它的机架之间相当宽阔，基座设计成为可以夹持长而窄的成形刃口或模具。用于各种扁钢和厚、薄钢板的弯曲和压制成形(如箱子、表盘、屋顶平台等)。

bending dies(压形模) 压力机模具用于将金属板料、线材压弯成各种形状。其工件是用冲头把坯料冲入模具的凹腔或压入有相似形状的凹槽里，或者由下落冲头操控的辅助装置而成形的。

bending moment(弯矩) 一个构件在力偶、横向力或两者共同的作用下，弯矩就是在其或左或右的任何一截面上的力偶、外力力矩或两者共同的代数和。

bending rolls(弯曲轧辊) 配有两个或更多个轧辊的各类轧机，用于弯板和型材的成形。

bend or twist(defect)[弯曲或扭曲(缺陷)] 一般在锻造或整形过程中产生的类似于翘曲的变形。当变形是沿其长度方向的就是弯曲，而按宽度方向的变形则为扭曲。当弯曲或扭曲超过公差时，则被认为是缺陷。校整工序包括手工校直、机器校直和冷打击整形。

bend radius(弯曲半径) (1)一根弯曲型材的内半径。(2)制造时，用以将金属压弯的工具的半径。

bend tangent(弯曲切点) 弯曲圆弧中止或发生改变的切点。

bend test(弯曲试验) 针对用于成形加工的金属(通常为厚、薄板料、带材或线材)进行的确定其相对塑性的试验，以及确定金属(例如在焊接之后)的安定性和韧度。通常是把试件按一定的圆弧弯过一定的角度，并且还要弯曲一定的次数。

beneficiation(富集、精选) 为矿石的熔炼进行富集和其他准备工作。

bentonite(膨润土) 一种像粘土一样的胶体状物质，从主要由高岭土一类的矿物质所组成火山灰里还原得到。它作为型砂的粘结剂使用。

Bessemer process(贝氏麦法,酸性转炉法) 一种炼钢工艺，将熔化的生铁装入耐火材料炉衬的炉体里，再用空气吹入、穿过熔料，通过氧化把大部分的碳、硅和锰去除。这种工艺在美国已基本不采用。

beta(β)ray(贝塔射线) 在某种原子核的自发蜕变过程中辐射出的一种电子射线。

beta(β)structure(贝塔结构) 一种被命名为休姆-饶塞里(Hume-Rothery)的类似于体心立方的相组织(与β黄铜相似)或电子化合物，后者具有三个价电子与两个原子之比。不要同相图中的β相相混淆。

bevel(坡口) 焊接预制件的边缘斜坡。

bevel flanging(折斜边) 同*flaring(卷边)*。

biaxiality(双轴性) 在双轴应力状态里的较小与较大主应力之比。

biaxial stress(双轴应力) 一种应力状态，通常三个主应力中只有一个为零而另外两个为拉应力。

billet(初轧坯) (1)一种半成品的型材，由金属锭轧制而成，矩形截面，面积为105～230cm^3(即16～36in^2)，其宽度小于两倍的厚度。当截面积大于230cm^3(36in^2)时称为初轧方坯，但不是很通用。而截面积小于105cm^3(16in^2)的一般称为棒材。(2)实心的圆或方的半成品，通过锻、辊轧、挤压的热变形加工制得。也见*bar(棒材)*。

billet mill(初轧机) 作为初轧用的轧机，用于轧制初轧坯。

binary alloy(二元合金) 仅包含两种元素组分的合金。

binary system(二元系统) 用两种组分以各种比例混合而成的一个完整的二元成分系列。

binder(粘结剂) (1)造型时用的一种材料，它不是水，但将其加入型砂里可以将颗粒粘结在一起，有时还需要加热。(2)在粉末冶金技术里作为粘结的介质：一种是加入粉末里仅提高其紧密性的湿态强度，而在烧结过程中被排除掉；或者是一种(通常相对低的熔点)加入到粉末的混合物中，以达到与粉末颗粒粘结在一起的特定目的，否则，单独颗粒无法成为坚固的烧结体。

binder metal(金属粘结剂) 作为粘结剂使用的金属。例如在结碳化物中的钴。

biological corrosion(生物腐蚀) 由于微生物的代谢作用使金属发生劣变。即所谓的生物附着(biofouling)。

bipolar electrode(双极电极) 电解槽中的一个电极，与电源没有机械连接，而是在电解槽里置于阳极和阴极之间；于是靠近阳极的部分变成阴极，而靠近阴极的部分变成阳极。所以也叫中间电极。

bipolar field(双极磁场) 在一个物体里面产生两个磁极的纵向磁场。比较*circular field(环形磁场)*。

black annealing(黑退火、初退火) 通过铁合金薄板、

带材和线材的装箱退火或装罐退火，使其氧化表面上产生黑颜色。见 *box annealing*（*装箱退火*）。

blackheart malleable（**黑心可锻铸铁**） 见 *malleable iron*（*可锻铸铁*）。

blacking[**黑色**（**造型**）**涂料**] 一种含碳的材料如石墨或碳粉，常同粘结剂相混合，并悬浮于水或其他液体，作为面料涂在砂型或砂芯的表面，以此降低铸件的表面粗糙度。

black oxide（**黑色氧化物**） 通过浸没在热盐氧化或盐溶液里，使金属表面产生黑色涂层。

blank （1）（**落料毛坯**）。成形加工中，利用落料模所下的金属薄板坯料，通常还要经过进一步的压力成形工序。（2）（**半成品**）。在压制过程中的粉末冶金预烧结或完全烧结，一般并不是最终加工状态，还要求通过切断、切削及其他的工序得到最后的形状。（3）用于制造锻件的毛坯，常叫 *slug*（*锻坯*）或 *multiple*（*锻坯*）。

blank carburizing（**空白渗碳**） 不加入碳的模拟渗碳过程。通常，其过程同时用惰性材料替代渗碳介质，或者在铁合金上使用一种适当的保护性涂层。

blankholder（**坯件夹**） （1）是拉模或成形模上的一个零件，用于将工件夹持固定在拉环上，以此控制金属流动。（2）是拉模或成形模上的一个零件，用于限制工件的运动，防止金属发生褶皱和撕裂。

blanking（**落料**） 通过冲、切割或裁剪，从坯料上得到已基本成形的零件的工序。

blank nitriding（**空白渗氮**） 不加入氮的模拟渗氮过程。通常，其过程同时用惰性材料替代渗氮介质，或者在铁合金上形成一种适当的保护性涂层。

blast furnace（**高炉，鼓风炉**） 一种竖炉，炉内的固体燃料在鼓风中燃烧，并以此在连续的过程中熔化矿石。若生产生铁炉里的温度必须很高，则空气需经过预热。如熔化铜、铅和锡矿炉里的温度可以低一些，故用小一些的炉子更经济一些，而且也不要求预热鼓风。

blasting or blast cleaning（**喷砂、喷丸或喷砂、喷丸清理**） 一种清理或光整金属物体的工艺，它利用气流或离心轮将磨粒喷射到工件的表面。小而不规则的金属颗粒作为喷丸用的磨粒，而砂子则作为喷砂用磨粒，还有钢丸也可作为喷丸用的磨粒。

blended sand（**混合砂**） 用不同粒度的砂子及粘土相混合，可获得适合于造型用的相应特性。

blending（**调和**） 在粉末冶金中，将按照各公称成分比例混合的粉末彻底调匀（不要与 *mixing*（*混合*）相混淆）。

blind riser（**暗冒口**） 在砂型中，不从顶部延伸外露的冒口。

blister（**表面凸起**） （1）一种铸件缺陷，在金属表面或靠近金属表面的地方，由于亚表层的气体膨胀所致。其特征是铸件表面平滑凸起，而且就在凸起的下面还有一个孔穴。（2）在涂层与基体之间缺少粘结的地方，出现圆形的隆起。

blister copper（**粗铜、泡铜**） 铜的炼制过程中的一种不纯的中间产品，是在转炉里吹铜锍时产生的，它得名于其铸造表面的许多大泡，因为此时 SO_2 和其他气体要释逸出来。

block（**粗锻**） 初始锻造工序。在锻件中大致分配金属，为精锻做准备。

block and finish（**粗锻并精锻**） 零件通过一次加热完成粗锻和精锻的锻造工序。利用同一套既有粗锻型腔又有精锻型腔的锻模。

blocker（**雏形锻模**） 锻模中锻出中间形状的型腔（常为单套锻模的一系列型腔中的一个），为锻出最终的形状作准备。也叫粗锻型腔。

blocker dies（**粗锻模**） 具有较宽厚的轮廓、大半径，拔模斜度为7°甚至更大，以及充足的表面粗糙度余量的锻模。也见 *finish allowance*（*加工裕量*）。

blocker-type forging（**粗锻型锻件**） 仅有最终零件的大致形状的锻件，它有着相对较大的表面粗糙度余量和半径。这种锻件有时专为降低其模具的成本，适合于数量要求较少的锻件，这样即使将每一个零件机加工至其最后的形状，也不至于超出其成本要求。

blocking（**粗型模锻**） 在锻造中采用闭口模具的初始工序，通常需加热并适当地分配锻件的金属，使其在精锻模具里能正确地填放。粗型模锻可以保证材料得到合理加工，并能延长模具的寿命。

blocking impression（**粗型模锻型腔**） 同 *blocker*（*雏形锻模*）。

bloom （1）（**大钢坯、钢锭或初轧方坯**）。热轧半制品、截面为矩形、在初轧机或开坯机上生产。也见 *billet*（*初轧坯*）。作为钢，初轧方坯的宽度不超过其厚度的两倍，横截面面积通常约不小于 $230cm^2$（$36in^2$）。有时，钢初轧方坯采用锻造得到。（2）电镀槽表面可见到的流痕或发花形状。（3）因烟雾、灰尘或油污薄膜在油漆表面沉积而成的浅蓝荧光色泽。（4）某些金属因暴露在潮湿环境里而生成的一种疏松、花样的腐蚀物。

blooming mill（**初轧机、开坯机**） 用于开坯或初轧的轧机。

blowhole(气孔、砂眼) 铸件或焊件里的气孔，因金属在固化过程中夹杂有气体所致。

blue annealing(发蓝退火) 热轧铁板在开式的炉子里加热并达到相变温度的范围，然后在空气中冷却使金属软化，于是在表面形成一层浅蓝色的氧化膜。

blue brittleness(蓝脆性) 某些钢在加热到约205～370℃(400～700℉)时出现的脆性，尤其当该钢在高温下处理时。镇静钢可以有效地避免这种脆性。

bluing(发蓝) 让无锈皮的铁合金表面与空气、蒸汽或其他介质在合适的温度下发生作用，生成一层蓝色氧化薄膜，以此改善其外观和耐腐蚀性。这种方法普遍用于薄板、带料或成品零件。它还指弹簧加工后的加热，用以改善其性能。

board hammer(夹板锤) 一种锻锤，其上模或锤头安装在夹板上，并由动力驱动辊轴将其高举到准备打击的位置，然后让其以重力落下。见 *gravity hammer(重力锤)*。

bolster(模板) 用于固定模具的平板，模具总成就可靠地安装在压力机的工作台表面上。在机锻里，这种板也与锤头相接在一起。

bond(粘结) (1)(**粘结**)在砂轮和其他较为刚性的磨削产品中，将磨削颗粒粘结在一起的材料。(2)(**接合**)指在焊接、硬钎焊或软钎焊中，连接件的接合。若使用金属填料，它就是熔化金属与所加热的基体金属之间的接合。(3)(**粘结线**)在粘结接合或扩散接合的连接中，沿紧密结合在一起表面的连接线。(4)(**接合**)指在热喷涂中，沉淀材料与基体之间的接合，或指其强度。

book mold(书模) 一种永久性的剖分模，其铰接像书脊一样。

bore(镗削孔) 不用钻头而是用单点或多点的刀具镗削出来的孔或圆柱形的凹孔。

boriding(渗硼) 增加物体表面层的硼化物浓度的热化学处理方法。这是一种在 Ac_1 以下进行的表面硬化工艺。也称硼化技术。

boring(镗削) 利用单点(偶尔也用多点)的切削刀具作平行于工件或刀具的旋转轴线的移动，切去金属并扩大孔径。

bort(钻石颗粒) (1)质量不适合用作宝石的天然钻石。(2)工业钻石。

bosh。(1)(**炉腹**)。指高炉中从风口开始向上延伸至炉身直径最大的部分。(2)(**炉衬**)。熔炼铜矿形成的一种石英炉衬，它使风口处的炉径减小。(3)(**清洗桶**)。一种用于清洗金属零件和装载干净零件的容器，容器的侧面是倾斜的。

boss(凸台) 铸件或锻件表面上的较低的、常为圆柱形的凸起。常用于钻孔和攻螺纹，以便与其他零件相接。

bottom board(底板) 在铸造中，为造砂型而支承在砂箱下的平板。

bottom drill(平头钻) 一种平端的麻花钻头，用于把钻成的锥底孔加工为圆柱平底面。

bottoming tap(平底、盲孔丝锥) 倒角为1至1½螺距的丝锥。

bottom pipe(底管) 扁坯、方坯或初轧坯的坯端的氧化物夹层或孔穴，是在初轧过程中钢锭端部发生折皱而形成的。底管并非管子，也不是缩孔，其实这个名称是一个误称。底管类似于一种挤压管。扁坯、方坯或初轧坯经初始轧缩之后，端部被截去并作为料头废弃。

bowing(成弓形) 相对于平度的偏离。

box annealing(装箱退火) 金属或合金在密闭容器中的退火，使其氧化条件最小化。在铁合金的装箱退火中，装料通常经过缓慢地加热到低于相变温度(有时也可超过)，随后缓慢冷却，这个过程也叫封闭退火或装罐退火。也见 *black annealing(黑退火)*。

boxing(环焊、绕焊) 绕过拐角的连续填角焊缝，作为主焊缝的延伸。

brake(压弯成形机) 一种把金属薄料弯成所要求角度的装置。

brale indenter(圆锥形金刚石压头) 锥形角为120°并带有锥尖(标准半径为0.2mm)的金刚石压头，用于规定型号的洛氏硬度计以及刻痕硬度试验。

brass(黄铜) $w(Zn)$多至40%的铜-锌合金，还可以添加少量的其他元素。

braze(钎焊) 一种焊接方法，把连接件加热到适当的温度，再使用其液相线高于450℃(840℉)且低于基体金属固相线的金属填料，让金属填料通过毛细管作用分布于连接件的紧密接合的表面之间。

brazeability(钎焊度) 在一定的制造条件下金属可进行钎焊的能力。以此作为规定的合理设计结构，并能达到满意使用要求的依据。

braze welding(硬钎焊) 一种焊接方法，使用液相线高于450℃(840℉)、低于基体金属固相线的金属填料。与钎焊不同的是，不靠毛细管吸收将金属填料分布于连接处。

brazing(钎焊) 一类焊接工艺，通过把连接件加热到适当的温度，再使用液相线高于450℃(840℉)、

低于基体金属固相线的金属填料把固体材料连接在一起，并通过毛细管吸收使金属填料分布于连接件的紧密接合表面之间。

brazing alloy(钎焊合金) 见 *brazing filler metal(钎焊金属填料)*。

brazing filler metal(钎焊金属填料) (1)填于毛细管间隙之间的金属，其液相线高于450℃(840℉)、低于基体材料的固相线。(2)用于钎焊和硬钎焊的非铁金属填料。

brazing sheet(钎焊填料薄板) 薄板形的钎焊金属填料。

breakdown(粗轧) (1)一种初始的辊轧或拉制工序，或一系列这样的工序，其目的在于精轧到要求尺寸之前减少一次铸造或挤压的定型。(2)一种初始压锻工序。

breaking stress(破碎应力) 见 *fracture stress(断裂应力)(1)*。

breaks(破裂) “未经回火”或经过时效的材料，由于超过其屈服强度而发生的褶皱或皱纹。根据破裂的成因，它们可被称为 *cross breaks(横折纹)*、*coil breaks(卷板折纹)* 以及 *sticker breaks(粘结条痕)*。

bridge die(桥式空心挤压模) 一种双截面挤压模，用于生产管子或复杂形状的中空型材，不需要使用分离式的芯棒。金属挤压通过一个桥形截面时被分流成两股，该截面附于主模截面上，并由其在模子的开口处固定一根中间芯轴，然后当金属进入模具以前，在挤压之下再次焊合。

bridging(跨接,搭桥) (1)在下面或远处的金属凝固之前，跨越型面的金属过早地发生的凝固。(2)化铁炉里的炉渣凝固于风口或刚好在风口之上的位置。(3)在垂直进料的冲天炉或熔化炉里的炉料，发生焊死或机械堵塞。(4)在粉末冶金过程中，粉末物质里面形成拱形孔穴。(5)在软钎焊中，两个或更多的导电体之间的一种不经意的钎焊连接，而不论这种连接是牢固的，还是仅有接触的。所以也叫跨越连接或焊料短路。

bright annealing(光亮退火) 在保护介质中进行退火，以防止光亮表面失去色泽。

bright dip(光亮浸液) 一种通过化学反应在浸没金属表面产生光亮的溶液。

brightener(光亮剂) 一种剂料或几种剂料的混合物，将其添加在电镀槽里，可以使沉积涂层产生光泽。

bright finish(光亮抛光) 在经磨削或抛光的辊子上产生高质量的表面粗糙度。适用于电镀件。

bright nitriding(光亮渗氮) 在保护介质中渗氮，以防止光亮表面失去色泽。比较 *blank nitriding(空白渗氮)*。

bright plate(光亮镀层) 在经镀层的状态下，一种具有光泽的电沉积。

brinell hardness number(布氏硬度值,HB) 与作用载荷及由压球在表面所压出的永久性压痕有关的数值，计算方法如下：

$$HB = 0.012 \times \frac{2F}{D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$$

式中，F 为试验力(N)；D 为球的直径(mm)；d 为压痕直径(mm)。

brinell hardness test(布氏硬度试验) 一种测定材料硬度的试验，用一个规定直径的硬钢或碳化物制成的球(标准直径为10mm)，以规定载荷压入被测试的材料。其结果用布氏硬度值表达。

brinelling(球形压痕) (1)一个固体表面由于受到局部的重复性冲击或者静压过载的作用，造成了上面的压痕。这种压痕常见于有滚动体的轴承里。(2)因过载而在固体轴承表面上产生的，以一处或多处的塑性压痕为特征的损坏。

brine quenching(盐水淬火) 用盐水(盐水-氯化物、碳酸盐和氰化物)作为介质的淬火。盐的加入可以提高在淬火过程的蒸汽相或热态下的水效率。

brittle crack propagation(脆性裂纹扩张) 一种非常突然的裂纹扩张，引起这种扩张除了其体内的弹性集聚外，并没有从外吸收能量。通过显微镜观察可观察到一些变形，尽管凭肉眼并不能看得很清楚。对照 *ductile crack propagation(塑性裂纹扩张)*。

brittle fracture(脆性断裂) 固体发生分裂时，几乎没有伴随任何在低倍放大镜下能看到的塑性变形。作为典型的脆性断裂都是由于快速的裂纹扩张而引起的，其能量消耗也比塑性断裂要小得多。脆性拉伸断裂的断口具有光亮和晶粒状的外观，很少、几乎没有缩颈。在断口表面呈现出人字形波纹，并指向裂纹的源点，平板形零件的脆性断裂尤为明显。例如，横向穿晶粒开裂(劈裂和准劈裂型断裂)和沿晶界开裂(解粘聚型破裂)都属于脆性断裂。

brittleness(脆性) 材料尚未有塑性变形就有发生断裂的趋势。对照 *ductility(塑性)*。

broaching(拉削) 用拉刀进行的切削。拉刀是一根由沿其表面上的单个或一系列多个切削刃(即刀齿)组合而成的棒形刀具。作为多齿型的切削刃或连续单齿的拉刀，其尺寸依次递增，并/或其形状

也依次变化。当拉刀与工件相对移动时，它沿着直线或轴线方向进行切削，也可以同时旋转。整个切削是由它一次或多次通过工件而完成的，并使工件的形状达到所要求的表面轮廓。

bronze(青铜) 一种富铜的铜-锡合金，视情况加入其他的元素，如锌和磷。扩展开来，某些铜基合金所含的锡比其他元素还少，例如锰青铜(铜-锌加上锰、锡和铁)、含铅锡青铜(铜-铅加上锡、有时也加锌)。还有，某些其他以双元为主的铜基合金根本就不含锡，如铝青铜(铜-铝)、硅青铜(铜-硅)和铍青铜(铜-铍)。另外，某些特定的铜基合金，无论其行业名称如何，实际上是黄铜，如建筑青铜(57Cu,40Zn,3Pb)、工业用青铜(90Cu,10Zn)。

bronzing(青铜化、镀青铜) (1)对铜或铜合金表面进行的化学最终处理以改变其颜色。(2)对不同的材料进行铜-锡镀层。

brush anodizing(刷阳极化) 类似于 *brush plating (刷镀)* 的阳极化工艺。

brush plating(刷镀) 利用吸附工具、划板或涂刷蘸上一种浓缩的溶液或胶质作为阳极(通常为不易溶解的)的电镀工艺。使用该镀刷在需要进行镀层的阴极表面进行来回刷镀。

buckle (1)(**熔模铸件表面缺陷**)。在失蜡铸造中，由于模型表层的剥落凹陷，造成铸件表面发生大的平面形的凸起。(2)(**砂型铸件表面缺陷**)。由于砂子的膨胀而造成铸件的凹坑，从此成为其缺陷扩张的起源。(3)(**轧材表面缺陷**)。金属棒或薄板上的局部波纹，通常横向于其轧制的方向。

buckling(弯曲、翘曲) (1)一种失效模式，其特征是：结构件因受到压缩作用，材料发生一种不稳定的横向变形。(2)在金属成形过程中，在压应力的作用下，工件发生鼓凸、弯曲、扭曲和其他波形变形。也见 *compressive stress (压应力)*。

buffer(缓冲剂) (1)一种物质，它的加入或存在可以把混合物中的一种或多种物质所产生的理化效应降低到最低限度。接受缓冲的性质包括 pH 值、氧化性以及火焰和等离子的温度。(2)也是一种物质，其目的是让水溶液中的氢离子浓度保持不变，甚至当酸或碱加入时也一样。每一种缓冲剂都有限于在一定 pH 值范围内才有效的特征。

buffing(抛光) 利用旋转的抛光轮将工件擦出光泽。

buffing wheel(抛光轮) 将软皮层叠到一定的表面宽度，再把它夹在两个法兰盘之间的轴上进行旋转。有时也称为磨轮。

buildup(熔敷,层积) (1)一种与众不同的焊接表面处理方法，即通过表面金属的沉积使之达到尺寸要求。也见 *buttering (涂镀)*。(2)在拐角或边缘的高电流密度区域发生的过量电极沉积。

built-up edge(切削瘤) (1)在切削过程中，切屑材料在切削刃附近的刀面上发生粘结。(2)特别在切削过程中，从与刀具相对静止的工件上脱落下来的材料。

bulging(扩胀) (1)罩盖、壳体或管子由于受到内部的扩冲，或者通过里面的空气、液体或半流体如蜡、橡胶和其他弹性体的冲压，使其外壁向外扩胀。(2)一种将圆柱形壳体的直径增大(通常扩成球形)的工艺。也可以将原来为直壁的各种壳体或箱体的外壁进行扩胀的工艺。

bulk forming(整体成形) 成形工艺，例如挤压、锻造、辊轧和拉伸，所用的材料为坯段、棒材、扁坯形的，在强大的压缩载荷的作用下，其表面-体积比大大增加。比较 *sheet forming (薄板成形)*。

bulk modulus of elasticity(K)(体积弹性模量) 即所谓的体积模量、压缩模量、液静压模量和体积弹性模量。对于抵御体积发生变化的度量，是液静压应力与相应的单位体积变化之比。其弹性常数表达为：

$$K=\frac{\sigma_m}{\Delta V}=\frac{-p}{\Delta V}=\frac{1}{\beta}$$

式中，K 为体积弹性模量；σ_m 为液静压或平均应力张量；p 为液静压力；β 为压缩率。

bull block(拉丝机) 一种从冷拔丝的机器，一个由动力驱动的旋转绕鼓将穿过拉丝模的金属丝拔出，并绕在其鼓上。

bulldozer(厚板矫正压力机) 缓慢作用的水平式压力机，机上有一很大的平台用于弯曲和矫正。其工作过程是在两个模具之间进行的，可以热压或冷压。该机器与锻压设备有密切的关系。

bullion(粗有色金属锭) (1)合金的炼制半成品，因含有足够的贵重金属，故有从中回收的价值。(2)精炼金或银，经延直成为金或银条。

bull's-eye structure(牛眼组织) 作为可锻或可延展铸铁的一种显微组织，即在珠光体基体中的石墨结核被铁素体层所包围。

bumper(造型机) 通过型箱反复剧烈的震动或摇动，使其里面的型砂紧实的机器。也见 *jolt ramming (震捣)*。

bumping。(1)由于多次反复的震动而在金属上形成盆形凹坑。(2)成形为凸头。(3)在薄板金属零件上留下接缝。(4)通过反复剧烈的震动或摇动将型

箱中的型砂捣紧实。

burned deposit(烧焦镀层)　由于电镀的电流密度过大而形成不平整的团状电极沉积。

burned-in sand(粘砂)　由砂子和金属混合粘连在铸件表面而形成的一种缺陷。

burned-on sand(焦砂)　由砂子和浇铸金属混合粘附在铸件表面。在一些情形里，有些类似于 *metal penetration (金属粘砂)*。

burned plating(烧镀)　见 *burned deposit (烧焦镀层)*。

burning(烧伤)　(1)由于过度加热而造成早期的熔化或晶界的氧化，而成为金属或合金的永久性损伤。也见 *overheating (过热)*。(2)在亚相变退火的过程中，特别是连续退火时，由于过长时间地加热到过高温度，因而造成表层的严重脱碳和晶粒粗化的结果。(3)在磨削过程中因使工件过热而造成的变色，或通过回火或硬化改变显微组织。(4)滑动接触中，在氧化环境里由于局部过热而造成的表面氧化。

burnishing(打磨、抛光)　利用光滑、固定或旋转的工具与工件表面(已经切削或磨削的)作点或线的接触，把表面的微凸体移位而不是去除，从而实现工件尺寸和表面粗糙度的精加工。

burnoff　(1)(**熔落**)。在连续电镀过程中，由于作用电流过大或接触面质量太差，而导致自动催化沉积薄膜从非导电基体上发生意外性脱落。(2)(**粉末冶金坯块脱脂**)。由于加热后紧接着进行烧结，因而导致挥发性的润滑剂(如硬脂酸盐)从金属粉末的坯块上失去。

burr(飞边、毛刺)　(1)由于切削、冲压或磨削而遗留在工件(例如锻件或金属板料毛坯)上的细小凸起或粗糙。(2)带有像手工锉刀似细齿的旋转刀具(小圆锯)。

burring(去毛刺)　同 *deburring (去毛刺)*。

bushing(衬套、导套)　轴瓦或导轨。

buster(成形模)　一对成形模，用于连接主要的锻压工序(如卷边和剪断)，或去除锻压件的毛边。

butler finish(无光精整)　一种半光亮的金属精整加工，由细微的、均匀分布的平行线条纹组成，通常用软磨料的抛光轮打磨得到；其外观类似于经过传统的手工擦研后的银子表面。

buttering(涂镀)　一种表面处理的方法。用一层或多层的金属焊料镀于构件的沟槽表面(例如,把一种高合金镀在钢的基体金属上,使不相类似的基体金属相焊接)。这种涂镀为随后完成的对接焊(连接)提供了一种适当的过渡性焊镀。

button　(1)坩埚或烤钵里的金属在熔化完成之后留在里面的金属珠子。(2)点焊、缝焊或凸焊的试件在破坏性试验中被撕裂的焊接接头部分。

C

cake(铸坯)　(1)铜或铜合金的铸坯，截面为矩形，用于轧制中厚板和带材。(2)未经压制的金属粉末坯料。

calcination(煅烧,焙烧)　通过对矿石进行加热、富集、沉淀或滤渣，使碳酸盐、水合物及其他化合物分解。

calomel electrode(甘汞电极)　(1)这是一种在酸碱度电位的测量、腐蚀性研究、伏安测量以及其他电极电位测量中，作为参考电极得到广泛应用的电极。(2)作为合剂 $Pt/Hg\text{-}Hg_2Cl_2/KCl$ 溶液的二次参考电极。对于 1.0*N*KCl 溶液，在 25℃(77℉)和一个大气压下，其相对于氢电极的电位为 +0.281V。

calorizing(表面渗铝)　通过将铝粉加热到 800 ~ 1000℃(1470 ~ 1830℉)，使铁或钢的表面形成耐氧化的能力。

camber(弯度)　(1)相对于其直边的偏离，通常指的是边线相对于一条直线的最大偏离。(2)将材料从薄板剪切下来时，将其弯曲偏离同处一个平面上的该薄板的倾向。(3)有时用于指轧辊的凸度，即增加其中部的直径，用于补偿由于辊压而引起的挠曲。(4)扁平电缆或柔性薄片相对于规定长度的直线的平面挠曲。具有这种弯度的扁平电缆或柔性薄片就像不设路拱的跑道弯道。

cam press(凸轮压力机)　一种机械成形压力机，它有一个或多个由凸轮控制的滑块；通常为双作用压力机，其中夹持毛坯的滑块是由凸轮控制的，通过该凸轮还可以获得一段压力保持。

can(金属封装)　一种软金属的包装，可以将经烧结的金属坯料封闭起来，以防止热工件(热等压、热挤压)发生严重氧化。

canning　(1)(**凹坑变形**)。在平板或近似平板金属表面上产生的盆状变形，有时也指油凹坑。(2)(**外皮包覆**)。将相对惰性的材料包在活性强的金属外面，以防止活动性强的金属在热变形加工时发生严重氧化。

capillary action(毛细作用)　(1)一种由于表面张力而将液体吸进固体内部的微小孔隙、细管和通道的现象。(2)指的是一种力，借助其作用使与固体接触的液体能在硬钎焊或软钎焊紧密配合的连接件表

面之间进行分布。

capillary attraction(毛细引力) (1)粘附和粘着的结合力，使液体，包括熔化的金属，在非常紧密的固体表面之间流动，甚至与重力方向相逆。(2)在粉末冶金中，使液体在烧结体的孔隙里进行渗透的驱动力。

capped steel(半镇静钢,压盖沸腾钢) 一种类似于沸腾钢的钢种。常在瓶盖似的锭模里进行浇铸，在其模子里利用机械或化学压盖的办法使顶部的金属凝固，从而使沸腾不能完全发生。压盖沸腾钢的表面状态与沸腾钢非常相似，但还是有些其他特征介于 *rimmed steel(沸腾钢)* 和 *semikilled steel(半镇静钢)* 之间。

capping(压盖) 由于在压头表面的边缘附近产生裂纹，并以对角的方向朝里延伸，因而导致粉末冶金压块部分或完全分裂成为两块或多块。

carbide(碳化物) 碳与一种或多种金属元素的化合物。

carbide tool(硬质合金工具) 通常以钴、镍或其他金属为基体，加入钨、钛、钽、铌的碳化物或它们的结合物，以此制成的切削或成形工具称为碳化物工具，即硬质合金工具。碳化物工具是以其高硬度和高抗压强度为特征的，经涂层之后，可提高其耐磨性。也见 *cemented carbide(硬质合金)*。

carbon arc cutting(碳弧切割) 一种电弧切割工艺，它以碳极与基体金属之间形成的电弧加热，并融化金属实现其分割。

carbon arc welding(碳弧焊) 一种电弧焊工艺，它以碳极与工件之间形成的电弧加热实现金属的连接。不用屏罩，压力与金属填料的使用可视情况而定。

carbon edges(碳素棱边) 沿钢板或扁钢的边缘处形成波纹形式的碳素沉积物。也叫蛇形边。

carbon electrode(碳极) 在电弧焊或电弧切割中，用作非填料充材料的电极，它由碳或石墨棒制成，可以涂之以铜或其他涂层。

carbon equivalent(碳平衡) (1)在铸铁中，碳、硅和磷之间总体含量的经验关系，用以下公式表达：

$$CE = \%C + 0.33(\%Si) + 0.33(\%P) - 0.027(\%Mn) + 0.4(\%S)$$

(2) 可焊性数值：

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5}$$

注：式中的数值均为质量分数。

carbonitriding(碳氮共渗) 一种表面硬化工艺，即将适当的铁材料加热到低于相变温度，并置于一个可以由表面同时吸收碳和氮的气体气氛中，通过扩散形成一个浓度梯度。这个热处理过程是以一定的速率冷却完成的，以此在工件中形成所要求的性能。

carbonization(碳化) 有机物质在高温下转变为元素碳的过程。不要与 *carburization(渗碳)* 相混淆。

carbonizing flame(碳化弧焰) 参见 *reducing flame(还原火焰)*。

carbon potential(渗碳气体的渗碳能力) 是对一种含有的活性炭的介质，在前面所述的条件下，改变或保持钢中含碳量高低的能力衡量。在任何特定的环境里，所保持含碳量的高低取决于温度、时间和钢成分的这些因素。

carbon steel(碳钢) 不得含有任何规定最低含量合金元素的钢，这里不包括以下这些一般最多可允许含量(质量分数)的合金元素：锰(1.65%)、硅(0.60%)和铜(0.60%)，还可以含量有限地含有除如碳、硅、锰、铜、硫和磷之外的一些元素。低碳钢的 $w(C)$ 可多达 0.30%，中碳钢的 $w(C)$ 可为 0.30%～0.60%，高碳钢的 $w(C)$ 可为 0.60%～1.00%。

carbonyl powder(碳酰粉) 通过金属羰基化合物，如四羰基化镍 $Ni(CO)_4$ 或五羰基化铁 $Fe(CO)_5$ 的热分解制备得到的金属粉。也见 *thermal decomposition(热分解)*。

carburizing(渗碳处理) 适当的碳素物材料通过接触和一般加热到超过 Ac_3 的温度时，碳被吸附和扩散进入固体铁合金。这是一种表面硬化的形式，碳从表及里形成延伸的梯度，从而以渗碳温度直接淬火，使表层硬化；或者先冷却至室温，再重新奥氏体化和淬火。

carburizing flame(渗碳火焰) 利用一种气体火焰将碳引入一些加热的金属里，犹如气体焊接工艺。渗碳火焰是一种还原火焰，然而还原火焰不一定是渗碳焰。

case(表层处理) 在热处理中，铁合金由表及里延伸的部分，成分在表面硬化过程中发生变化，这部分合金的主要考虑有：①其成分含量与原来的成分相比，要有适度的改变；②如进行金相腐蚀，则会显得更亮；③其硬度比心部高。对照 *core(心部)*。

case crushing(表层破碎) 表示经表面淬火的齿轮因断裂而产生的纵向缺口。

case hardening(表面硬化) 一般表示用于钢的若干种处理过程，通过碳、氮或两者混合物的吸附、扩

散形成其浓度梯度，以改变表层的化学成分。常用的工艺有渗碳和淬火、氰化、氮化以及碳氮共渗。故建议以它们所规定采用的工艺作为其名称。

CASS test(铜加速盐雾试验) 为 *copper-accelerated salt-spray test(铜加速盐雾试验)*的缩写。

castable(耐火混凝土) 铸造中用的一种耐火颗粒与适当粘结剂的结合物，一般添加相应的液体后，将其倒入模中按耐火形状或结构成形，并因化学作用而固结。

castability(可铸造性) (1)液态金属性质和凝固特性的复杂结合，以此促成精确且完整的铸件成品。(2)熔化金属流经模型或铸型的容易程度。

casting(铸件) (1)通过将液态金属倒入或注射入模型，铸成一种所要求形状的物体。它有别于机械工艺成形。(2)将熔化金属倒入模型，得到所要求形状的物体。

casting defect(铸件缺陷) 铸件上不完善的地方，而且有一处或多处未能达到设计或质量指标的要求。该术语的意思常限于因不适当的固结而形成的裂纹。

casting shrinkage(铸件收缩) 铸件在模型或型腔里凝固并冷却至室温，然后从模型或模具取出后，其单位长度上的尺度变化。有三种不同的铸件收缩：液体收缩指的是液体金属冷却至其液线温度时的体积减小；凝固收缩是指从凝固开始到结束的金属体积的减小；而固体收缩则是指从固线温度到室温的金属体积的减小。

casting strain(铸件应变) 由铸件冷却而引起的铸造应力，在铸件内部所形成的应变。

casting stress(铸造应力) 在冷却的过程中，因铸件形状妨碍铸件凝固时的收缩而产生的残余应力。

cast iron(铸铁) 这是铸造铁素合金家族的一个通用术语，它的含碳量超过其共晶温度下，碳在奥氏体里的溶解度。大部分铸铁的含碳量(质量分数)至少为2%，再加上硅和硫，其他合金元素的含量可视情况而定。也见 *compacted graphite iron(致密石墨铸铁)*、*ductile iron(球墨铸铁)*、*gray iron(灰铸铁)*、*malleable iron(可锻铸铁)*、*white iron(白口铸铁)*。

cast steel(铸钢) 铸件形式的钢。

cast structure(铸造组织) 以一种铸件的晶粒形状和取向以及其里面杂质的偏析为其特征标记的金相组织。

catalyst(催化剂) 一种能改变反应速度而自身不受任何实际变化的物质。

catastrophic failure(突发性失效) 元件或装置突然发生的失效，往往还会引起其周围的元件或装置发生连锁性的次生破坏。

cathode(阴极) 电解槽里的负极，槽里发生的主要是还原反应(在外回路中电子流向阴极)。典型的阴极过程就是正离子吸收电子并被放电，氧被还原，而且一种元素或一组元素从高价被还原成低价状态。对照 *anode(阳极)*。

cathode copper(阴极铜) 在电解提炼中，沉积在阴极上的铜。

cathode efficiency(阴极效率) 在阴极的电流效率。

cathode film(阴极膜) 在电解过程中，溶液里直接接触阴极的部分。

cathodic cleaning(阴极清洗) 工件为阴极的电解清洗。

cathodic corrosion(阴极腐蚀) 通常由一种两性金属与电解过程中的碱性产物发生反应，形成一种结构的阴极状态，因而造成的腐蚀。

cathodic pickling(阴极酸洗) 工件为阴极的电解酸洗。

cathodic polarization(阴极极化) 由于电流的流动而引起电极电位沿活性(即负的)方向发生变化。也见 *polarization(极化)*。

cathodic protection(阴极保护) (1)通过施加一外加的电动势，将电极的腐蚀电位向较低的氧化电位转移，以此降低腐蚀的速率。(2)通过伽伐尼电流或外加电流使之成为阴极，而实现金属的部分或完全防腐保护。对照 *anode protection(阳极保护)*。

cathodic reaction(阴极反应) 相当于把负电荷从电子导体向离子导体转移的电极反应。阴极反应也是一个还原过程。腐蚀过程中一个带有共性的例子为：$M(aq)^{2+} + 2e^- \rightarrow M(s)$。

catholyte(阴极电解质) 电解槽的阴极附近的电解质。

cation(阳离子) 带正电荷的离子，它在电位梯度的影响下通过电解质向阴极移动。也见 *anion*(阴离子)和 *ion(离子)*。

caustic(氢氧化物) (1)烧灼或腐蚀。(2)轻金属的氢氧化物，如氢氧化钠和氢氧化钾。

caustic cracking(碱性裂纹) 应力-腐蚀裂纹的一种，常见于暴露在200～250℃(400～480℉)温度的浓氢氧化物溶液里的碳钢或铁-铬-镍合金中。即所谓的碱性脆化。

caustic dip(碱性刻蚀、清洗) 将金属浸没在强碱溶液里进行刻蚀、酸性中和，或把诸如油脂或油漆的

有机材料清洗掉。

caustic embrittlement(碱性脆化) 这是现已不使用的历史用术语，表示碳钢或铁-铬-镍合金中的一种应力-腐蚀裂纹形式，最为常见的是暴露在200～250℃(400～480℉)温度的浓氢氧化物溶液里所造成的。

caustic quenching(碱性淬火) 用5%～10%的氢氧化钠的苛性碱溶液(NaOH)进行淬火。

cavitation(气蚀) 在液体中含有蒸汽、气体或二者兼而有之的气穴或气泡的形成和破灭。一般说来，气蚀起源于液体中静压的降低。它与沸腾中的类似情况是有区别的，后者起因于液体温度的升高。气蚀和沸腾之间的有些差别还难以搞清楚，因此这里也只能给出这样较为一般性的定义。为了用气蚀方法浸蚀固体表面，有必要让气蚀泡沫靠上或挨近其表面进行破灭。

cavitation corrosion(空泡腐蚀) 腐蚀和气蚀相结合的过程。

cavitation damage(气蚀损坏) 固体表面因为暴露在气蚀中而受到损伤，包括材料的缺损，表面的变形或性能、外观的变化。

cavitation erosion(气蚀冲蚀) 由于连续暴露于气蚀里，因此其原始材料不断地从固体表面失去。

cavity(空腔) 模型或模具的型腔，用于形成铸件的外形。

CCT diagram(连续冷却转变图,CCT图) 见 *continuous cooling transformation diagram(连续冷却转变图)*。

cell(electrochemistry)[电解槽(电化学)] 由浸没在电解质里的一个阳极和一个阴极所构成的电化学系统。阳极和阴极可以是分离的金属，或属同一件金属上的不相似的区域。电解槽包括其外部回路，使电子得以从阳极流向阴极。也见 *electrochemical cell(电化学槽)*。

cementation(渗入处理) 通过在高温下的扩散将一种或多种元素输入金属物体的外表部分。

cement copper(沉积铜) 当铁(常用废的碎钢片)与稀释的硫酸铜溶液长期接触时，可以通过化学沉积对粗铜进行还原。

cemented carbide(硬质合金、烧结碳化物) 将一种或多种的金属碳化物粉末(如碳化钨)和更为少量的金属(如钴)作为其粘结剂进行混合，再将其压制和烧结成为固体或粘结块。

cementite(渗碳体) 一种硬(800HV)而脆的铁和碳化合物，即所谓的碳化铁并具有近似化学分子式 Fe_3C，它是以正交晶体结构为特征的。当它作为一相而生成在钢里时，其化学成分将由于锰和其他碳化物组成的元素的存在而发生变化。从白口铸铁中可观察到这种最高渗碳体的含量，它应用于有高耐磨要求的情况下。

center drilling(中心钻) 在工件的端部钻出的短锥孔——给车床车削时的工件中心定位。

centerless grinding(无心磨) 将工件是支在支承刀板上而不是支在两中心间进行的磨削。工件是由称为调整轮或进给轮的带动而旋转的。

centrifugal casting(离心铸注) 浇注模的方式：①将金属倒入围绕水平轴或垂直轴旋转的砂型或金属型；②将金属倒入一个模型，随后使其在金属凝固之前进行旋转。也见 *centrifuge casting(离心铸造)*。

centrifuge casting(离心铸造) 一种铸造技术，其模型的空腔相对于与其直浇口共线的垂直轴线呈空间对称。在浇铸和凝固过程中，整个装置绕着该轴线旋转。

ceramic tool(陶瓷刀具) 通过将氧化铝基或氮化硅基的陶瓷材料进行烧结、热压或热等压而成的切削刀具。

cermet(陶瓷合金) 一种由金属粘结的陶瓷粉末所构成的粉末冶金产品。

C-frame press(C形框架压力机) 同 *gap-frame press(马鞍形压床)*。

CG iron(CG铁) 同 *compacted graphite cast iron(致密石墨铸铁)*。

chamfer(倒棱) (1)表面倒角，即去除锐棱。(2)齿角处铲过后角的切削刃。

chamfer angle(倒角角度) (1)锥面与参考表面之间的夹角。(2)在铣削的轮廓上，锥面与刀具轴线之间的夹角。

chamfering(倒角) 给工件的边缘加工出斜面。也称为倒锥。

chaplet(芯撑) 在铸模里支撑砂芯的金属支柱，熔化的金属在其周围凝固，并将其熔化进最后的铸件中。

charge(炉料) (1)装入炉子里的炉料。(2)在一个填料周期里装入炉内的不同重量的液体和固体材料。

Charpy test(夏比试验) 一种冲击试验，利用一种刻有V形凹槽、矩形凹槽或U形凹槽的试件，将试件两端支撑起来，再用一个安置于能摇摆的摆杆下端的冲击锤从槽的背面冲击试件。在断裂中，被吸收的能量可以通过在没有试件时摆锤所能达到的

高度和有试件经冲击断裂后所实际达到的高度来进行计算。比较 *Izod test*（*悬臂梁式冲击试验*）。

chase（machining）（切削螺纹） 每次作一组切削，除了第一刀，之后沿其刀路继续切削，如切削螺纹。

chatter（震颤） （1）在切削或磨削过程中，因刀具、砂轮或工件的震动而造成工件表面的波纹。（2）在切削或磨削过程中，由这种振动形成的表面粗糙度。（3）在摩擦学中，因摩擦或其他不稳定性而造成的弹性振动。

chatter marks（震痕） 经磨削的工件表面上的瑕疵，通常是因为在磨削过程中，从砂轮-工件界面传递出来的振动所造成的。

check（分型面） 砂型的中介截面，当要求对有一个以上的分离平面的形状进行翻砂造型时，就要在上、下型箱之间用到这个截面。

checked edges（锯齿边） 热轧和/或冷轧之后，可见到的锯齿形边缘。

checkers（格子砖室） 与金属冶炼炉相连的烟道室里，用格子砖以开放式砌成能吸收燃烧物所产生的热量，随后当进风的风流方向反向时又将该热量带进炉内。

checks（细裂纹） （1）在涂层或金属零件表面上的无数非常细微的裂纹。这种裂纹往往在加工或工作时出现，最有可能的是与热处理或热循环有关。所以也叫细纹或 *heat check(s)*（*热裂*）。（2）铸件表面上的细微裂纹，是在冷却过程中不均匀的膨胀或收缩而造成的。（3）模腔角落处的细微裂纹，一般是由处于较为尖锐的角落处的锻造应变或压力所致。相对于模腔的深度，太硬的模块就有可能在模腔角处产生这种细微裂纹或发展成为裂缝。（4）热锻模里，因热疲劳而生成的一系列小裂纹。

chelating agent （1）（**螯合剂**）。一种溶液里的原子与金属构成超过一个以上同位键的有机化合物。（2）（**螯合剂**）。用于金属光整加工的一种物质，用于控制或消除某种以不应有的含量而存在的金属离子。

chemical conversion coating（化学转变涂层） 一种保护性或装饰性的非金属涂层，它是由金属与其周围可选介质发生化学反应的生成物。它常用于进行有机涂层之前的表面处理。

chemical deposition（化学沉积） 金属从它的盐溶液中沉积或从镀层中析出，这是通过将另一种金属或试剂的引入来实现的。

chemical flux cutting（化学助熔切割） 在氧-切割过程中，借助化学助熔剂促使金属分离。

chemical precipitated powder（化学沉淀（金属）粉） 一种金属粉末，它是通过化学置换而产生的很细的析出物。

chemical machining（化学切削） 借助可控的选择性化学溶解作用实现金属加工裕量的切除。

chemical metallurgy（化学冶金学） 见 *process metallurgy*（*工艺冶金学*）。

chemical milling（化学铣削） 一种切削工艺，通过把金属表面的某些部分遮盖起来而把不需要的部分材料腐蚀掉，以此将金属加工成为复杂的形状。

chemical polishing（化学抛光） 利用化学腐蚀溶剂的作用实现表面抛光的过程。腐蚀溶剂是能优先把表面形貌中的一些凸峰给溶解掉的化合物。

chemical vapor deposition（化学气相沉积，CVD） 一种涂层工艺，类似于气体渗碳和碳氮共渗，据此将作为反应剂的气氛气体充入处理室里，并在里面的工件表面上分解，然后使其中一种材料释放出来由工件吸收或累积在工件表面；而第二种材料则以气体形态释放出来，并随同过剩的介质气体排出处理室。

chemical wear（化学磨损） 见 *corrosive wear*（*腐蚀磨损*）。

chevron pattern（人字形断口样式） 一种断口形式，看上去像“V”字形的层层叠嶂并呈辐射状痕迹（剪切脊梁），故有时也称为鱼骨形的样式。可以从零件的脆性断裂表面上看到典型的人字形断口样式，而且零件的宽度要明显大于其厚度。人字形的尖端可以溯源到断裂的源头。

chill（冷激） （1）镶嵌在铸造砂模或泥芯表面的金属或石墨，有时也置于模腔内，以此提高该处的冷却速度。（2）灰铸铁或球墨铸铁中产生的白口铸铁，就像楔形试验中用的冷楔。也见 *chill iron*（*冷铁*），与 *inverse chill*（*反白口*）相比。

chill iron（冷铁） 放入在金属模里或置于模芯后面的一些铸铁，以此形成快速凝固，常因此有可能在铸件中形成白口组织。

Chinese-script eutectic（中国字迹的共晶体） 一种共晶体组分的分布式样，特别是在一些含有铁和硅的铸铝合金中，以及含有硅的镁合金中可以发现，并具有类似于中国字迹的特征。

chip breaker（断屑器） （1）刀具的前面上与刃口相平行的刻槽或沟槽，用以切断连续的切屑。（2）夹持在切削刀具前面的一个位置可调节的台阶零件。

chipping（修整） （1）用平凿或圆凿以手工方法清理

金属的焊缝或其他表面上的缺陷，或者在进一步加工之前通过连续切削进行修整。(2)同样，可以此去除多余的金属。

chips(切屑) 利用切削刀具或磨削介质，从工件上切削下来的材料碎屑。

chlorination(氯化处理) (1)在同氯或氯化物的盐类接触过程中焙烤矿石，以此生成氯化物。(2)让氯气通过熔化了的金属(如铝和镁)，以此去除解析出来的气体及所携带的氧化物。

chromadizing(铬酸处理) 通过与铬酸溶液的处理改进油漆在铝或铝合金上的粘附性，主要用于飞机机身。也称为 chromidizing 或 chromatizing(铬酸盐钝化处理)，但不要同 *chromating(铬酸盐化)* 或 *chromizing(渗铬处理)* 相混淆。

chromate treatment(铬酸盐处理) 金属在六价铬化合物溶液中的处理，产生一种由三价和六价铬化合物组成的改性涂层。

chromating(铬酸盐化) 进行铬酸盐处理。

chromizing(渗铬处理) 在高温下的一种表面处理。一般在容器、蒸汽或盐浴中进行的，在里面通过铬向基体金属内部扩散而形成一种合金。

chuck(卡盘) 在机器上夹持工件或刀具的装置，这样在切削或磨削的过程中，工件可以被牢牢夹持住或作旋转。

CIP(冷等压) *cold isostatic pressing(冷等静压成形)* 的缩写。

circle grid(圆格花纹) 制作在金属薄板板料上的一种有规律的圆圈图案，其圆形花纹的直径常为2.5mm(0.1in)。

circle-grid analysis(圆格分析) 通过分析金属薄板板料上圆圈图案的变形情况确定其变形严重程度。

circle grinding(圆磨) 特指 *cylindrical grinding(外圆磨)* 或 *internal grinding(内圆磨)*。

circle shear(圆盘剪) 一种剪切机床，由两片圆形刀片安装在一对平行的轴上同步旋转，并装上一种能剪切圆形工件的附件。它只能剪切要求内部为圆的工件，而不能用于剪切要求其外面为圆的工件。

circular field(环形磁场) 指的是这样的磁场：①磁场围绕着一个非磁性的导电体；②磁场完全被包含在一个磁性的导电体里；③磁场同时存在于磁导体的内外。只要电流通过零件或零件的截面，就会引起作用于任何磁导体的磁场。与 *bipolar field(双极磁场)* 相比。

clad brazing sheet(包覆钎料薄板) 用 *brazing filler metal(钎焊金属填料)* 包覆单面或双面的金属薄板。

cladding(包覆层) (1)用机械或冶金的方法将一层材料(常用金属)，粘结在基体上。可以采用多种工艺，如辊轧包层和爆炸成形法将包覆层粘结在基体表面。(2)以较厚的材料层(1mm 或 0.04in)用于表面镀敷，其目的在于提高耐腐蚀性或其他性能。也见 *coating(涂层)*、*surfacing(堆焊)* 和 *hardfacing(表面硬化)*。

clad metal(包覆层金属) 包含两层或两层以上并粘结在一起的复合金属。粘结可以通过合轧、合挤、焊接、扩散粘结、铸造、重度化学沉积和重度电镀方法实现。

clamshell marks(蛤壳纹路) 见 *beach marks(沙滩纹路)*。

classification(分级) (1)通常按照沉积法的斯托克斯定律将矿石按大小、规定重量进行分类。(2)按颗粒的大小将金属粉末进行分类。

clearance(间隙) (1)配合零件之间的间隔或空隙。(2)切削刀具后面与已切削表面保持的间隙。

cleavage(劈裂) (1)因裂缝扩展穿越低位结晶平面而造成的晶体断裂。(2)沿着确定结晶平面而开裂或迸裂的趋势。

cleavage fracture(劈裂断裂) 通常是指多晶金属的断裂，其中大部分的晶粒因开裂而损坏，呈现出许多光亮的小反射面。这是一种晶体断裂类型，并与低能量的脆性断裂有关。对照 *shear fracture(剪切断裂)*。

cleavage plane(劈裂面) 容易发生劈裂断裂的一个特征性晶体平面，或者晶体中的一组晶面。

climb cutting(顺切) 与 *climb milling(顺铣)* 相似。

climb milling(顺铣) 铣削中铣刀在其接触点沿进给的方向移动。

close annealing(封闭退火) 同 *box annealing(装箱退火)*。

closed-die forging(闭式模锻造) 加热金属的成形是在由上、下模具合拢时，将工件所有侧面都予以封闭的模壁或空腔内完成的。而锻压的型腔可以完全处于一个模具或上、下两个模具里。型腔模锻造常与闭模锻造相通用，都是指其闭模操作，此时模具还要为控制过量材料的流动或由此产生的模锻飞边提供保障。与此对应的是无飞边锻造，材料在凹腔里变形极少或几乎没有过量的材料时会成为飞边冒出。

close dies(闭式模具) 锻造或成形的型腔模具，其设计可确保金属的流动限制在整套模具的凹槽内，

这与开式模具不同，后者对金属的横向流动极少或没有限制。

closed pass(封闭通过轧制) 金属通过轧辊轧制时，其下辊的凹槽深度超过所轧制棒料的厚度，而上辊有一凸缘与该凹槽相配，从而可以得到所要求的没有飞边或毛刺的形状。

close-tolerance forging(精确公差锻造) 按照特别精确的尺寸公差进行的锻造，锻造之后只需很少甚至不用切削加工。也见 *precision forging(精密锻造)*。

cluster mill(多辊轧机) 一种轧机，其每一个小直径的工作轧辊都拥有两个甚至更多的大直径支承(轧)辊作为支撑。

coalescence(聚合) (1)通常呈弥散相态的颗粒，在低于熔点的温度作用下聚集成为大的集合体。(2)材料经焊合逐步聚集在一起，或增长成为一体。(3)晶粒通过吸收对其余部分进行消化，从而不断增大；或者是一个物相或颗粒通过吸收或再沉淀对其余部分进行消化，从而不断增大。

coarsening(粗化) 晶粒尺寸的增大，往往由于晶粒的生长所致，但也不尽然。

coated abrasive(涂层磨料) 一种打磨用产品(如砂纸)，它的一层磨削颗粒是用胶或合成树脂粘结剂牢牢地粘附于纸、布或其他纤维载体上。

coated electrode(涂层焊条) 见推荐用术语 *covered electrode(涂料焊条)* 和 *lightly coated electrode(轻质涂层焊条)*。

coating(涂层) 以很薄的材料(<1mm,或0.04in)涂覆于表面，旨在达到防腐、耐高温下起锈皮、耐磨、润滑等其他目的。

coaxing(预应力强化法) 通常从低于材料的疲劳强度开始，逐步增加作用于试件的应力幅度，以此提高试件的疲劳强度。

coefficient of friction(摩擦因数) 两个物体之间的摩擦力(F)同法向压力(N)之间的无量纲比值：(μ 或 f) = (F/N)。

coercive force(矫顽磁力) 为使磁通密度降低至零，以相反方向作用于原磁化力的磁化力，以此作为磁性材料顽磁性的测量。

cogging(初轧、开坯) 利用锻锤或锻压机床将锭料加工成初轧坯的压缩工序。

cogging mill(初轧机、开坯机) 同 *blooming mill(初轧机、开坯机)*。

coherent precipitate(粘合沉淀) 由固溶体形成的一种结晶沉淀，而这种固溶体具有一种在沉淀物晶格与基体晶格之间保持连贯性的晶体取向，这两种晶格间还伴随着某种应变。由于晶格在沉淀物与基体之间界面上的相互匹配，故不会有可辨认的相界存在。

cohesion(粘合) (1)单质颗粒由于初始和二次化合价力的作用而聚合在一起的状态。在粘合处使用时，其状态为粘合剂(或被粘合体)的颗粒聚集在一起。(2)单一物相内的分子(或原子)之间的吸引力。对照 *adhesion(粘附)*。

cohesive strength(粘合强度) (1)造成仅有拉伸断裂而没有塑性变形的假想应力。(2)与原子间作用力相应的应力。

coil (1)(**线圈**)由一个或一个以上的磁力线绕组所构成的组件。(2)(**卷材**)成卷状的金属薄板或带材。

coil breaks(卷板折纹) 在薄板或带材上出现的一种与轧制方向相垂直的平行线折痕迹，一般都是横贯薄板、带的整个宽度。

coining(压印) (1)闭口挤压工序，通常为冷挤，所有的工件表面都限制或约束于挤压过程中，以致模具在工件上压出轮廓清晰的印痕。(2)一种打击整形工序，用于使已有的圆弧或轮廓更清晰或对其作些改变。(3)粉末冶金烧结块的最后一道压形，以此获得清晰的表面形态(不要同 *sizing(精整加工)* 相混淆)。

coin silver(造币合金) 一种 w(Ag)为90%的合金，并常以铜作为其合金元素。

coke(焦炭) 一种疏松、灰色和难溶的材料，通过将烟煤、石油或煤焦油脂干蒸馏得到，即把其中大部分的挥发性物质都抽去，作为燃料用于化铁炉里。

cold box process(冷芯盒制芯工艺) 在翻砂造型过程中，将双组分的有机树脂粘结剂与常规的混料混合在一起，在室温下将其射入空腔或有固体型芯的模型里。随后把混有空气的蒸汽注射向型芯，使其迅即凝结，随即将金属围绕着型芯倒入。

cold chamber machine(冷室压铸机) 一种带有喷注系统的压铸机，将另行设置的炉子所熔化的金属注入其喷注系统。比较 *hot chamber machine(热室压铸机)*。

cold compacting(冷成形) 参见 *cold pressing(冷压)*。

cold cracking(冷裂) (1)冷的或接近于冷的金属铸件，因收缩而引起的内应力过大，并由此造成裂纹。这常常是因为模具太硬或铸件设计不当所致。(2)一种焊接裂纹的类型，通常发生于205℃(400℉)以下。其开裂发生于冷却到室温的过程中

或在这之后，有时会有相当长时间的延迟。有三个因素结合起来产生冷裂：应力（如因热胀冷缩引起）、氢气（因含氢的焊接耗料）和最为敏感的显微组织（片状马氏体对裂纹最为敏感）。也见 *hot crack*（*热裂*）、*lamellar tearing*（*层状撕裂*）和 *stress-relief cracking*（*应力消除开裂*）。

cold die quenching（冷模淬火） 利用冷、平或成形的模具吸取零件上的热量进行淬火。冷模淬火进行得很慢、而且贵，只限用于有大表面积的较小零件。

cold heading（冷镦头） 在室温下加工，使毛坯的局部或全部的横截面积增大。也见 *heading*（*镦头*）、*upsetting*（*镦粗*）。

cold inspection（冷检验） 一种在室温条件下对锻件进行缺陷、尺寸、重量和表面状况的目视检验（通常为终检）。这个术语用于某些无损检测，例如磁粉检测、着色渗透检测和超声检测。

cold isostatic pressing（冷等静压成形，CIP） 在室温条件下利用高流体压力使粉末（金属或陶瓷）零件成形的技术。水或油作为其压力介质使用。

cold lap（冷皱痕） （1）铸锭或铸件表面因为其表面的早期凝固和过低的浇铸温度而生成的叠层皱痕。（2）当工件首次进行锻造时，由于在模具型腔里没有正确到位而造成的裂缝。疤痕的形成、后续的压模又将金属叠压在上述缝口，因而在工件表面留下疤痕。也见 *cold shut*（*冷叠合疤*）。

cold mill（冷轧机） 冷轧薄板或带材的轧机。

cold pressing（冷压） 在不会发生烧结的足够低的温度（通常为室温）条件下，将粉末冶金的坯块压制成形。对照 *hot pressing*（*热压*）。

cold-rolled sheets（冷轧薄板） 在室温下将经酸洗的热轧卷材进行深度的冷压延，由此得到金属轧制产品。其产品常常还要求进一步的加工，使之适合最普通的应用。这种一般的终端产品与热轧板比较是以其优质的表面、相当均匀的厚度以及优良的力学性能为特征的。

cold-setting process（冷凝结工艺） 是指在翻砂作业中，凡采用有机粘结剂凝聚砂型或型芯的各种方法，即靠的是催化剂而不是加热的方法进行聚合（凝结）。

cold shortness（冷脆） 在低于重结晶的温度下，存在于某些金属上的脆性。

cold shot（冷凝结疤） （1）铸锭或铸件表面上可见到的局部早期凝固，这是在浇铸时因熔化金属溅射到冷的模型壁上所造成的。（2）嵌在铸件上尚未完全熔化的小金属熔珠。

cold shut（冷叠合疤） （1）由于两股液体金属汇到了一起，却未能熔合成一体，从而出现在铸件表面上的不连续性。（2）锻件或坯料表面上的叠痕，因为在压制变形过程中没等熔合就叠合在一起了。（3）模型在浇注充满之前，铸锭上表面的凝固所造成的疤痕。

Coldstream process（气流破碎工艺——高硬度破碎式粉末生产法） 在粉末冶金工艺中，硬质颗粒在高速冷气流中通过颗粒碰撞而发生劈裂破碎的一种方法。也称为碰撞粉碎。

cold treatment（冷处理） 将钢置于适当的零下温度（－85℃或－120℉）使其获得所要求的状态或性能，如尺寸或显微组织的稳定性。若该处理中包含有残留奥氏体的转变，则还要进行回火处理。

cold trimming（冷整形） 在室温下，利用整形压力机去除锻件上的飞边和多余的金属。

cold welding（冷焊） 一种固态焊接工艺，即在室温下使用压力使其发生焊接处的深度变形，从而实现金属的连接。比较 *hot pressure welding*（*热压焊接*）、*diffusion welding*（*扩散焊接*）和 *forge welding*（*锻造焊接*）。

cold work（冷作） 金属中由应变硬化所伴随着的永久性变形。

cold-worked structure（冷作组织） 金属或合金在低于其重结晶温度的条件下，因塑性变形而形成的显微组织。

cold working（冷变形加工） 在会引起应变硬化的温度和应变率的条件下让金属发生塑性变形。但通常不是一定都是在室温下进行上述变形。对照 *hot working*（*热变形加工*）。

collapsibility（崩塌性） 型砂混料因铸造过程中产生的压力、温度的作用而发生崩塌的趋势。

collet（有缝夹头） 在切削和磨削过程中，用于夹持工件或刀具的带缝口的轴套。

color buffing（镜面抛光） 通过抛光最终得到很高的光亮度。有时也叫 *coloring*（*光亮加工*）。

coloring（光亮加工） 通过化学或电化学反应在金属表面得到所要求的光泽。也见 *color buffing*（*镜面抛光*）。

columnar structure（柱状组织） 由于晶粒沿同一方向生长而形成的平行延伸的粗糙组织，在铸件里最为常见，但有时也可从伴随发生固态转变的扩散性生长所形成的组织里见到。

combination die（组合模） （1）同一压铸模有两个或

两个以上不同的型腔，用于铸造各不相同的铸件。(2)用于成形加工，见 *compound die*（*复合模*）。

combination mill（联合轧机） 由用于粗轧的连轧机和用于成形的导向轧机或环轧机相组合的一种机组配置。

combined carbon（复合碳） 铁或钢中所含的碳与其他元素是以化学形式结合在一起，而不是像石墨或回火碳的那样处于游离状态。分析上有总碳和石墨碳之别。对照 *free carbon*（*游离碳*）。

combined cyanide（复合氰化物） 以金属氰化物复合离子形式存在的氰化物。

combined stresses（复合应力） 任何一个应力系统都无法用单一的应力组分所代表，即这是一个比简单的拉、压或切应力更为复杂的系统。

combustion analysis（燃烧分析） 一种确定样品中碳和硫浓度的分析技术。将样品放在一个有氧存在的坩埚里燃烧，导致碳和硫作为二氧化碳和二氧化硫离开样品，然后用红外或热导的方法测定这些气体。

comet tails（彗尾磨痕） 一组较深的相同方向的划痕，它们是在机械抛光的过程中形成于显微组织间断的邻近处。它们具有一般的彗星尾部形状。也只有当抛光布在表面保持同一方向进行抛光时，才会形成彗星尾。

comminution（粉碎、磨碎） (1)将矿石粉碎或磨成细粉末。(2)用机械的方法将金属细化成粉末。(3)但通常也不是全用磨削或碾研的方法将粉末的颗粒进一步细化。也见 *pulverization*（*粉碎*）。

compact（坯块、紧实） (1)将金属粉末压缩而形成的物体，一般都是封闭在模具里进行的。(2)指做成坯块的工序或过程，有时也称为压制。

compacted graphite iron（致密石墨铸铁） 具有形状介于作为典型灰铸铁的片状和作为完全球化球墨铸铁的球状之间的石墨铸铁。作为一种合格的致密石墨铸铁组织要求其不含片状石墨，<20%的球形石墨和约80%的致密型石墨（ASTMA247，Ⅳ类）。又如已知的CG铸铁或蠕虫形铁，致密石墨铸铁就是用类似球墨铸铁的方法制造的，但是不能使用完全球状石墨结核形成的技术。

compacting pressure（紧密压力） 在粉末冶金中，与压头接触面积有关的规定压紧力，可用MPa，MN/m^3 或 tf/in^2 表示。

compaction（压缩） (1)在压力或冲击作用下将粉状或晶粒状的材料挤压在一起（固结），形成相对致密的物质或成形的物体。(2)在粉末冶金中，通过压缩粉末制备坯块或物体，通常封闭在模具里进行，是否含润滑剂、粘结剂以及是否同时采用加热均可视情况而定。

compatibility（相溶性） 材料在固态下能够相互可溶的程度的一种度量。

complete fusion（完全熔化） 在需要焊接的整个基体材料表面，以及所有焊料层面与焊道之间都发生的熔化。

complexing agent（络合剂） 一种作为电子供体并且能与金属离子结合生成可溶的络合离子的物质。

complexion（络合离子） 由两种或两种以上的离子通过附加反应而生成的离子。

component (1)（**成分**）。用于定义化学（或合金）系统中的各元素或化合物中的一种，作为有可能是最少的物质种类来说，还包括所有的物相。(2)（**分量**）。指在一坐标系里的构成一矢量的多个分支中的一个。(3)（**元件**）。组成物理的独立物体中的单个功能性元素，而且它不能被进一步缩小或分割，否则就会使其规定的功能受损。例如一个电阻、电容、二极管或晶体管。

composite coating（复合涂层） 一种金属或非金属上的涂层，它由两种或两种以上的成分组成，其中一种常为微粒的形式。例如硬质合金刀头上的金属陶瓷复合涂层。它也是为大家所熟知的多层涂层。

composite electrode（复合焊条） 由两种或两种以上的组分制成的焊条，其中至少有一种为金属填料。复合焊条可以有各种不同的物理形式，如多股绞合线、填料管或包皮线。

composite joint（组合连接） 在机械连接的基础上，再用焊接进行连接的多重连接。

composite material（混合材料） 两种和两种以上的材料（增强性元素、填料和复合基粘结剂），以较大成分比例相组合的不同形式结合物，其各组成物均保持其各自的特性，即尽管它们在一起作用，但决不会熔化或汇合成另一种材料。正常情况下其组分可以进行物理鉴别，并相互间能表现出界面。例如陶瓷合金和金属基复合材料。

composite plate（多层板） 至少由两种不同成分组成的多层电沉积板。

composite powder（复合粉末） 一种粉末，其每一个颗粒都是由两种或更多种不同材料组成。

composite structure（组合结构） 一个结构件（如面板、盘、管或其他形状）是由两个或更多个不同元件粘结而成的，其中各构件可以分别用金属、合金、

非金属或复合材料制成的。复合结构的例子有整流器面板、包装板、轴瓦、硬质合金刀头的钻头和车刀，以及由两种或更多种不同合金构成的焊合件。

compound compact(复合坯块) 由混合的金属制成的粉末冶金坯块，其金属粉末颗粒通过压制、烧结或两者均有而结合起来，而且结合后的每一种金属颗粒还主要保持其原先的成分。

compound die(复合模) 在压力机上以一次行程给一个零件上完成一个以上工序的模具。例如落料和冲孔，所有的冲压功能都限制在加工坯料的尺寸范围内同步进行。

compressibility(压缩性) (1)粉末在给定的温度、压力下，经压制成形为轮廓清晰、结构稳定的坯块的能力，也是对粉末颗粒可塑性的一种衡量。(2)在确定的试验条件下所测定的密度值。参见compactibility(压塑性、成形性)。

compression ratio(powder metallurgy)(粉末冶金压缩比) 疏松粉末的体积与由它压制而成的坯块体积之比。

compressive strength(抗压强度) 材料所能开发出来的，在其初始横截面积上能承受的最大压应力。如果材料在压缩的作用下因粉碎性断裂而破坏，那么抗压强度就会有一个非常确定的数值；如果材料在压缩作用下，并未因粉碎性断裂而破坏，那么得到的抗压强度就是一个任意性的数值。这被认为是表明材料达到完全失效的变形程度。

compressive stress(压应力) 引起一个弹性体沿其作用载荷的方向产生变形(变短)的应力。对照 *tensile stress*(*拉应力*)。

concentration(浓度) (1)单位容积的样品中所含有的一种物质的质量。如每升含有的克数。(2)通过将矿石中的废料或矿渣进行分离和去除来提高其品位的富集过程。

concentration cell(浓差电解槽) 一种电解槽，其电动势是由电解过程中的某种组分的浓度差所引起的。由于这种差异而形成相分离的阴极区和阳极区。

concentration polarization(浓差极化) 因电流通过电解质而引起浓度的变化，以致在槽里形成极化的部分。

concurrent heating(并行加热) 在焊接或切削过程中，给工件辅助加热。

conditioning heat treatment(预热处理) 一种初步热处理，为材料下一步的热处理所要求的反应准备。为明确其词义，必须准确规定要进行的热处理。

cone(火焰锥部、焰心) 氧燃气火焰紧接喷嘴外的部分。

cone angle(锥角) 作为一种刀片可调的铰刀，刀具轴线与其刀片调整时的移动方向之间形成的夹角，刀片的基面可在由此所形成的圆锥面上滑动。

conformal coating(仿形涂层) 一种与被涂物体的形状准确配合的涂层。

congruent melting(固液同成分熔化) 一种等温或等压熔化，固相与液相在其整个转变过程中保持相同的成分。

congruent transformation(同成分转变) 金属的等温或等压相转变，在其转变过程中的两种相自始至终保持相同的成分。

conjugate phase(共轭相) 在显微组织分析中，指的是能在单一的温度、压力条件下，保持平衡并维持一致成分的物质状态。例如双相平衡图中的两种共存相。

constant life fatigue diagram(恒定寿命的疲劳图) 在失效分析中的一组曲线(通常是在直角坐标图里)，其中每一条都可用于表示某单一疲劳寿命(周数)、有关的交变应力、最大应力、最小应力及其中值应力。一般可以从一组S-N曲线中推导出恒定寿命的疲劳图，其中每一条都代表剩余寿命为50%的不同应力比。也见 *nominal stress*(*名义应力*)、*maximum stress*(*最大应力*)、*minimum stress*(*最小应力*)、*S-N curve*(*S-N曲线*)、*fatigue life*(*疲劳寿命*)和 *stress ratio*(*应力比*)。

constituent(组分) (1)组成一个化学系统的成分之一。(2)一种物相或几种物相的结合，它在合金的显微组织中以一种特征形态出现。

constitution diagram(状态图、相图) 见 *phase diagram*(*相图*)。

constrain(制约) 任何限制横向收缩的制约，正常情况下与其纵向拉伸有关，并且还因此在横向方向造成二次拉伸。通常与焊接关联使用。对照 *restraint*(*约束*)。

consumable electrode(自耗式焊条) 所有以金属填料为主制成的电弧焊焊条的一般术语。规定使用的名称如 *covered electrode*(*涂料焊条*)、*bare electrode*(*裸焊条、无药焊条*)、*fluxcored electrode*(*熔芯焊条*)以及 *lightly coated electrode*(*轻质涂层焊条*)。

consumable-electrode remelting(自耗式电极重熔工艺) 一种金属的冶炼工艺，在一水冷的模型里电流在以冶炼前的金属为电极和冶炼后的金属锭块之间通过。并且都置于一水冷的模型里。由于电流的

通过，电极上会形成熔滴，并落到锭块上面。冶炼过程可以在与大气接触、真空或熔滴掉落所经过的炉渣里进行。也见 *electroslag remelting*（*电渣重熔*）和 *vacuum arc remelting*（*真空电弧重熔*）。

contact corrosion（接触腐蚀） 主要在欧洲用于表示不同类别金属之间的电腐蚀。

contact fatigue（接触疲劳） 表面因受到交变赫兹应力的作用，而产生裂纹及进一步形成的点蚀，如在滚动接触或滚滑结合的接触情况里，就会产生这种接触疲劳。接触疲劳是在滚动轴承或齿轮中最常见的现象，在其正常运行过程中，表面因集中载荷而产生很高的应力，同时被很多次地反复作用。

contact plating（接触电镀） 一种金属电镀工艺，其电镀电流是由工件金属与第二件金属之间的电（伽伐尼）作用来提供的，而无需使用外接的电源电流。

contact potential（接触电位） 在腐蚀技术中，由不同类别的物质间的接合而形成的电位差。

container（型腔） 锭块或轧坯在挤压前所进入的空腔。有时将在挤压杯形或罐形零件时，压向后面的型被腔称为模具。

contaminant（污染杂质） 存在于材料或介质中的杂质或外来物质，它们将影响到材料的一种或多种性质。

continuous casting（连续铸造） 一种铸造技术，铸件随着凝固从模型底部连续地出来，因此铸件的长度并不取决于模型的尺寸，主要用于生产一些轧制半成品，例如初轧坯、大钢坯、铸锭、带材和管材。

continuous cooling transformation（CCT）diagram（连续冷却转变图） 以对数为时间、线性为温度的坐标系里的一组曲线，作为一种合金的每一条冷却曲线，都可以确定其初始相转变的开始和结束。

continuous mill（连轧机） 它是由数对同步轧辊组成（前后串形排列）的辊轧机，当金属通过这些不同的轧辊时，经受连续的压缩。

continuous phase（连续相） 在含有一种以上相的合金或部分合金中，以一种为基体相，在其里面的其他相均以弥散型存在。

continuous precipitation（连续沉淀） 在过饱和固溶体里发生的沉淀，其沉淀颗粒通过大范围的扩散得到增长而没有发生基体的重结晶。连续沉淀是从整个基体里若干均匀分布的晶核开始生长的。通常它们都是随机取向，但可以形成一种维德曼斯忒顿（Widmannstätten）组织。也称为一般性沉淀。与 *discontinuous precipitation*（*断续沉淀*）、*localized precipitation*（*局部沉淀*）相比。

continuous-type furnace（连续炉） 用于材料热处理的一种炉子，材料从一个炉门进，从另一个炉门出，连续地进行处理。

continuous weld（连续焊） 焊接从连接件的一端延伸到另一端连续地进行，或者连接件基本上是圆形的，焊接绕焊件一周进行。与 *intermittent weld*（*断续焊接*）相反。

contour forming（轮廓成形） 见 *roll forming*（*轧制成形*）、*stretch forming*（*拉伸成形*）、*tangent bending*（*切向弯曲*）和 *wiper forming*（*回转弯曲成形*）。

contour machining（仿形切削） 不规则轮廓表面的切削，如仿形车、仿形镗和仿形铣。

contour milling（仿形铣） 不规则表面的铣削。也见 *tracer milling*（*仿形铣*）。

contraction（收缩） 金属或合金凝固或冷却至室温时，其体积发生的变化。

controlled atmosphere（可控气氛） （1）一种规定的惰性气体或混合气体，并且在预设的温度下进行所要求的工艺。（2）用于烧结时防止粉末坯块发生氧化和损坏的条件。

controlled cooling（控制冷却） 按照预定的方式让金属或合金从较高的温度冷却下来，以防止产生硬化、裂纹或内部损伤，或者由此形成所要求的显微组织和机械性质。

controlled-pressure cycle（可控压力周期） 一种成形循环周期，在此过程中，成形型腔里的液压压力受一个调节凸轮所控制，而凸轮又是与冲头的行进相协调的。

controlled rolling（控制轧制） 一种热轧工艺，在其轧制过程中钢的温度是受严密控制的，尤其是最后一道轧制过程，因此可以产生粒度很细的显微组织。

conventional forging（常规锻造） 这种锻造以其设计的复杂性和尺寸公差均属于一般锻造业务的大范围里为特点。

conventional milling（逆铣） 铣削中铣刀在其接触点逆向进给的方向移动。对照 *climb milling*（*顺铣*）。

conventional strain（公称应变） 见 *engineering strain*（*工程应变*）和 *strain*（*应变*）。

conventional stress（公称应力） 见 *engineering stress*（*工程应力*）和 *stress*（*应力*）。

conversion coating（转换涂层） 一种由表面金属的化合物构成的涂层，它是通过金属的化学和电化学处理而形成的。其例子包括锌、镉、镁和铝的铬化

(酸盐)涂层，钢的氧化和磷化(酸盐)涂层。也见 *chromate treatment*(*铬酸盐处理*)和 *phosphating*(*磷酸盐处理*)。

converter(转炉) 一种冶炼炉，空气从熔化的金属或经粗制的金属中通过，并将杂质氧化，其氧化反应所产生的热可维持所需要的温度。一种典型的转炉就是氩氧脱碳炉。

coolant(冷却液) 在磨削时用于冷却工件的液体，并防止其生锈。它同时也是润滑液，并将切屑和磨粒冲洗掉，有助于得到更好的表面粗糙度。在金属切削中常用术语为切削液。

cooling curve(冷却曲线) 表示在材料的冷却过程中，时间与温度之间关系的图形。它常用于找到发生相变的温度。偶尔也有用性质或性能代替该曲线图中的时间，如热膨胀。

cooling rate(冷却率) 在规定的时间和温度的区间里的时间-温度曲线的平均斜率。

cooling stresses(冷却应力) 在冷却过程中因温度的不均匀分布，而在铸件中形成的残余应力。

cope(上箱、型、模) 在砂箱、铸型或模型中最上面的一部分。

copper-accelerated salt-spray test(铜加速盐雾试验) 用于一些电沉积和铝表面阳极涂层的一种加速腐蚀试验。

copper brazing(铜硬钎焊) 表示以铜为金属填料的硬钎焊的一个非正规用术语。

core (1)(**型芯**)。插入型腔中的一种专门成形的材料，用于形成铸件内部的结构形状，或者对于铸件来说很难用模型来实现的其他部分的形状。(2)(**心部**)。作为表面硬化(淬火)的铁合金，其中未被硬化的部分。一般所指的部分为：①在经(某种特定的腐蚀剂)腐蚀的金相样品横截面上所显示的暗黑色；②有着基本不变的化学成分；③硬化后，仅有低于规定数值的硬度。

core assembly(组合泥芯) 在铸造中，由多个部分组合而成的复杂型芯。

core binder(型芯粘结剂) 在铸造中，用于使芯砂颗粒粘结在一起的材料。

core blow(泥芯气孔) 在铸件型芯附近通向心部型腔的气穴，即由型芯中渗透出来的气体所形成的气孔。

core blower(气动造芯机) 一种制造型芯的机器，用压缩空气将芯砂吹入芯盒，并予以紧实。

core box(芯盒) 在铸造中，用木头、金属或塑料制成的构件，它包含了成形的空腔，将芯砂填入该空腔并经紧实制成型芯。

core bars(心棒) 在粉末冶金中，一种棒形的坯块，它利用其自身的电阻加热到足以将其内部结构熔化的温度。

core forging(模锻) (1)借助凸模将金属填入模具的凹腔里。(2)以上述工序制成的产品。

core knockout machine(打芯机) 铸造时，把型芯从铸件中打出来的机器。

core rod(心杆) 粉末冶金的模具里用于在坯块中塑出一个孔的零件。

core sand(芯砂) 铸造时用于做型芯的砂子，将一种粘结剂加入使之有粘性，且在干燥后有透气性，通常粘土里的透气性要低一些。

coring(成核化) (1)由于会在一个温度段的范围里发生非平衡凝固，所以在显微组织(如枝状晶体、晶粒、碳化物颗粒)单元体的中心和表面之间存在可变成分的状态。(2)经过挤拔的棒料头端部出现的中心凹陷成为挤缩管。有时称为 *extrusion pipe*(*挤压缩管*)。

corona(resistangce welding) (**焊点晕(电阻焊)**)。在表面紧密接触进行点焊而形成熔核的周围，有时会出现一定程度的固态焊合。

corrodkote test(镀层涂膏密室放置耐蚀试验) 用于电镀的一种加速腐蚀试验。

corrosion(腐蚀) 材料(通常为金属)与环境发生的化学或电化学反应，并因此造成材料及其性能的劣化。

corrosion effect(腐蚀效应) 因腐蚀而造成腐蚀系统中任何部分所发生的变化。

corrosion embrittlement(腐蚀脆化) 金属由于受到腐蚀而严重丧失塑性，通常是晶间腐蚀且不易看到。

corrosion-erosion(腐蚀-冲蚀) 见 *erosion-corrosion*(*冲蚀-腐蚀*)。

corrosion fatigue(腐蚀疲劳) 在腐蚀作用和周期性载荷反复作用同时存在的条件下的一种金属早期断裂过程，其要求的载荷应力大小和作用周期数要比不在腐蚀环境中的都要小得多。

corrosion inhibitor(腐蚀抑制剂) 见 *inhibitor*(*抑制剂*)。

corrosion potential E_{corr}(腐蚀电位 E_{corr}) 在电解液里，腐蚀表面相对于参考电极的电位。也叫静止电位、开路电位或易于腐蚀的电位。

corrosion product(腐蚀生成物) 由腐蚀而产生的物质。

corrosion protection(防腐) 对腐蚀系统的改进，以使腐蚀损害得以减轻。

corrosion rate(腐蚀率) 金属在单位时间里的腐蚀效应。腐蚀率的种类通常取决于工艺系统和腐蚀效应的种类。因此，腐蚀率可以表达为单位时间里的腐蚀深度[穿透率,例如(mil/a)[⊖]]或单位时间里在单位面积上转变为腐蚀物的金属质量[失重,如($g/m^2/a$)]。腐蚀效应会随时间变化而变化，且在腐蚀表面的所有点上是不一样的。所以腐蚀率的表述应该与腐蚀效应的种类、时间相关性以及发生腐蚀效应的区域相联系。

corrosion resistance(耐腐性) 材料所具有的，不会因为与周围的自然因素或特别的人造氛围相接触而造成其性质的劣化或改变的能力。对于金属应该是点蚀或锈蚀，对于有机材料则是龟裂。

corrosion system(腐蚀系统) 由一种或多种金属与影响腐蚀环境的方方面面所构成的系统。

corrosive wear(腐蚀磨损) 一种具有明显的与环境发生化学和电化学反应特征的磨损。

corrugating(波纹板加工) 一种使金属板成为有一系列平行直条的脊、谷交替图案的成形加工，利用配置与其形状相吻合的模辊的轧机辊压而成，或者在带有特别形状的冲头和压模的轧压机上压制而成。

corrugations(波纹) 在金属成形加工的冷压制或热压制过程中，带钢所变成的具有横向波纹的形状。

Cottrell process(静电除尘法) 以静电集尘的方法将其中的固体微粒去除。

coulometer(库仑计) 按照法拉第定律产生的化学作用测量电量的一种电解槽。

counterblow hammer(上下锤作相对运动的锻锤) 一种锻锤，它利用空气或蒸汽活塞，使锤头和锤砧同时相向而动。

counterboring(平底锪孔) 利用一种旋转的、并带有导向的双刃或多刃的端部切削刀具，对零件上的孔按其深度进行扩大，通常其刀具上还附有直形或螺旋形槽，用于排出切屑并通入切削液。

countersinking(锪锥形沉孔) 对工件沿其孔的周边进行扇形或锥形的切削加工，形成一个与孔的中心线相交且夹角小于90°的同心表面，其目的在于给孔倒角或沉入螺钉头、铆钉头。

covered electrode(涂料焊条) 一种复合焊条，其心部为裸焊条或金属芯焊条，在其外部裹着能为熔焊金属提供充足焊剂的覆盖层。该覆盖层包含着能起到屏蔽大气、脱氧和稳定电弧作用的材料，还可以作为一种焊接金属添加剂的来源。比较 *lightly coated electrode (轻质涂层焊条)*。

covering power(覆盖能力) (1)溶液具有的一种能在非常低的电流密度下及存在着凹点和凹坑的条件下进行令人满意电镀的能力。它还表示一种能够镀覆均匀镀层的能力，但未必一定能实现，因此电镀能力指的是在一个具有不规则形状物体上获取均匀厚度镀层的能力。(2)搪瓷涂料涂覆其底层表面的程度。

crack(裂纹) (1)一种断裂形式，以尖锐的末梢和大长宽比的开口为其特征。(2)尚未完全分离的线状断裂。

crack growth(裂纹生长) 在静载或动载的作用下，裂纹在材料中延伸扩展的速率。

crack length(depth)(a)(裂纹长度(深度 a)) 在疲劳和应力腐蚀的开裂过程中，用于测定裂纹生长率和应力强度系数的实际裂纹尺寸。对于压实型的试件，裂纹长度是在载荷作用支点间的连线上测量的。对于中心裂纹拉伸试件，裂纹长度是在中心裂纹的垂直平分线上测量的。见 *crack size*(裂纹尺寸)。

crack mouth opening displacement (裂纹开口度, CMOD) 见 *crack opening displacement (裂纹开度)*。

crack opening displacement(裂纹开度) 在 K_{Ic} 试件上，凹槽表面上沿同时与凹槽平面和裂纹相垂直的方向上的开口宽度。在裂纹尖端处的宽度叫裂纹尖端开度(CTOD)，而裂纹开口处的宽度则叫裂纹口开度(CMOD)。K_{Ic} 的定义也见 *stress-in-tensity factor (张度应力系数)*。

crack size(a)(裂纹尺寸) 裂纹在主方位平面上的线性测量。这个测量一般用于表述应力和开度场的量化计算。在实际中，裂纹尺寸可根据分析需要针对具体裂纹大小、初始裂纹大小或有效裂纹大小用不同测量方法得到。也见 *crack length 裂纹长度(深度)*。

crack tip opening displacement (裂纹尖端开度, CTOD) 见 *crack opening displacement (裂纹开度)*。

crank press(曲柄压力机) 一种其滑块是用曲柄连杆机构驱动的机械压力机。

crater(弧坑) 电弧焊的焊缝末端或焊道熔池处出现的凹陷。

crater crack(弧坑裂纹) 在焊缝弧坑处产生的裂纹。

⊖ 原文用 yr 表示年，根据 ISO 国际单位制，应用 a 表示年，全文统改。——编者注。

crater wear(弧坑磨损) 切削刀具前倾面上的磨损，是由于切屑沿该表面流出时的材料接触而产生的。

craze cracking(微裂纹) 金属因为热的周期性变化而产生的不规则表面裂纹。这个术语在英国比在美国用得多一些，后者常用的是 checking(细裂纹)。也见 *checks(细裂纹)*。

creep(蠕变) 在应力作用下的因时间而产生的应变。以衰减的速率产生的蠕变叫做初级蠕变，以最小并恒定的速率产生的叫做次级蠕变，而以加速速率产生的则叫做三级蠕变。

creep-feed grinding(蠕动进给磨削) 大背吃刀量、小进给量的磨削工艺。

creep limit(蠕变极限) (1)在给定的时间里，产生的蠕变小于规定值的最大应力。(2)在不变的载荷作用下和在恒定的温度里，使蠕变应变速率随时间保持连续递减时的最大名义应力。有时作为蠕变强度(creep strength)的同义语使用。

creep rate(蠕变速率) 在给定时刻的蠕变-时间曲线的斜率。在给定的静载作用下，相对于时间的偏移。

creep recovery(蠕变松弛) 作用力撤除后固体中的应变随时间变化而减小。

creep-rupture embrittlement(蠕变断裂脆性) 在蠕变条件下的脆性。脆性材料因晶间裂纹而发生的失效。

creep-rupture strength(蠕变断裂强度) 在规定不变的环境里，蠕变试验到给定时间时造成断裂的应力。有时也就是所谓的应力断裂强度。

creep-rupture test(蠕变断裂试验) 在试件发生断裂过程中，同时测量其渐进式变形及其时间的一种试验。一般来说，其变形远大于在蠕变试验中产生的变形。这也就是所谓的应力断裂试验。

creep strain(蠕变应变) 在蠕变试验过程中，由作用应力所产生的与时间有关的总应变(延伸段加上初始的标样长度)。

creep strength(蠕变强度) 在规定不变的环境里，蠕变试验到给定时间并引起给定应变时的应力。

creep stress(蠕变应力) 恒定的载荷除以试件的原始横截面积。

creep test(蠕变试验) 在一定的载荷作用下和一定的温度里，测定金属所产生的延伸方法。其测定通常包括在不变的载荷作用下，画出时间-延伸长度曲线，一个试验可延续数月的时间。其结果以针对一个给定的标样长度(如 25mm 或 1in)上的每小时的延伸长度(mm 或 in)表达。

crevice corrosion(裂隙腐蚀) 在处于或直接邻近于与环境完全隔绝的范围里的金属表面上产生的局部腐蚀，而这种隔绝也是因为其金属与另一种材料表面间的紧密贴近而形成的。

crimping(卷边) 为了弯边和接缝而压制成相对较小的波形，即在金属带上形成一段弧形，或者给已有的圆弧或直径进行缩径。也见 *corrugating(波纹板加工)*。

critical cooling rate(临界冷却速度) 这是防止发生不该发生的相转变而能采用的最低连续冷却速度。对于钢，除非另有规定，它也是奥氏体从临界温度以上可以冷却的最慢速度，以免发生高于马氏体起始温度的相转变。

critical current density(临界电流密度) 在电解过程中，会使工艺变量、电镀或镀膜性质发生突变的电流密度。

critical flaw size(临界缺陷尺寸) 在特定的应力值条件下，在一构件中足以造成失效的裂缝(缺陷)尺寸。

critical point(临界点) (1)使晶体组织、相或物理性质发生变化的温度或压力。也用相变温度这一术语。(2)在相平衡图里，一个非均相系统达到平衡时的成分、温度和压力的组合体。

critical shear stress(临界切应力) 在给定的滑移平面上，沿指定方向发生滑移所需要的切应力。如果该切应力是由作用在晶体上的拉力或压力造成的，则称之为临界分解切应力。

critical strain(临界应变) (1)在力学试验中，在屈服点的应变。(2)刚够产生再结晶的应变，因为这种应变很小，通常仅百分之几，仅仅从几个晶核开始发生再结晶，但由此能产生构成非常大晶粒的再结晶组织。

critical stress intensity factor(临界应力强度系数) 见 *stress-intensity factor(应力强度因数)*。

critical temperature(临界温度) 超过该温度就不再能够通过加压使蒸汽凝固成液体。如果压力恒定，则它与 *critical point(临界点)* 同义。

critical temperature range(临界温度范围) 是 transformation ranges(相变范围)的同义语，后者为优先选用术语。

Croning process(壳型铸造法) 在铸造中，一种使用酚醛树脂粘结剂的壳模工艺。有时也称为 C 工艺或 chronizing(壳型铸造)。

crop(钢锭收缩头) (1)钢锭的头部作为废料截去的部分。(2)剪切棒料或方锭。

cross breaks(横折纹) 同 *coil breaks(卷板折纹)*。

cross-country mill(横穿轧机) 一种机座工作台同与其相连的输送(穿越)工作台成平行安置的轧机。这种轧机用于不能在普通棒材轧机上进行轧制的结构型材、轨道及各种异形棒材。

cross direction(横向) 见 *transverse direction(横向)*。

cross forging(横锻) 用平板模锻造锻坯的粗锻，以改善其力学性能，特别是位于其重型型材的中心部分。

cross rolling(横轧) 金属、中厚板或薄板的轧制，其辊轧的方向与其前一次的轧制约成90°夹角。

cross-wire weld(叉丝焊) 一种在线材或棒材的交叉节点处的焊接。

crown (1)(**压力机横梁**)。成形压力机的上面部分(头部)。在液压压力机的头部通常还包括液压缸，而机械压力机的则包括驱动机构。也见 *hydraulic press(液压机)* 和 *mechanical press(机械压机)*。(2)(**修磨形状**)。平板轧辊的一种修磨形状，以此保证冷(或热)轧薄板或带钢的平度。(3)(**凸度**)。薄板或轧辊的一种使其厚度或直径从边缘到中心逐步增大的轮廓形状。

crucible furnace(坩埚炉) 一种用于熔化金属或盛载液态金属的炉子，它是一种壶形(半球形)的壳体。在壳体的外面用电加热器或燃料火焰燃烧器加热，由此产生的热量透过坩埚壳体使金属熔化。

crush(压碎) (1)由于铸模闭合时的定位不准，造成铸模的截面发生弯曲或破裂。(2)当铸模闭合时的型砂发生移动时，造成铸件表面的凹坑。

crush forming(砂轮整形) 通过将一个旋转的金属辊子压入砂轮表面对砂轮进行修形，以此复制所要求的轮廓。

crushings test(压碎试验) (1)适用于管子、烧结金属轴承或其他类似产品的一种径向压力试验，以此确定其径向压碎强度(压缩的最大载荷)。(2)用于确定管道质量的一种轴向压缩试验，如焊接管的焊缝坚固性。

cryogenic treatment(冷冻处理) 见 *cold treatment(冷处理)*。

crystal(晶体) (1)由原子、离子或分子以一种三维的重复分布的形式构成的一种固体。(2)原子接近完全地按照一种叫做“晶格”的特定顺序，几何矩阵分布的物质的形式、颗粒或其一部分。晶体还展示了具有特征的光学性质及其他性质，以及沿其特征性的方向生长和表面劈裂。

crystalline(结晶体) 明显地由(一个或多个)晶体构成的物质形态，即与玻璃型或无定形相反的形态。

crystalline fracture(晶体断裂) 由于许多单个晶体的劈裂而造成的断裂，在多晶体金属断口表面上反射出来的许多闪亮小晶面的样式。与 *fibrous fracture(纤维状断裂)* 和 *silky fracture(丝光断裂)* 相反，也见 *granular fracture(粒状断裂)*。

crystallization(结晶化) (1)固体的结晶体相通常经过冷却从液相中分离出来。(2)晶体首先核化(开始)，然后在能提供其原子的基质介质中不断长大的渐进过程。其基质可以是气体、液体或其他晶体形式。

crystal orientation(晶体方位) 见 *orientation(晶格方位)*。

crystal system(晶体系统) 所有的晶体可以分为七类：三斜晶系、单斜晶系、正交晶系、六方晶系、三角(菱形)晶系、正方晶系和立方晶系。

cubic plane(立方平面) 在立方(等轴晶的)晶系里，三条结晶轴中的任何一条与之相垂直的平面，其密勒指数为{100}。

cup(杯形制品) (1)金属薄板零件，经过第一次拉伸工序的制品。(2)一端封口的圆柱形零件或壳形。

cup-and-cone-fracture(杯形和锥形断口) 一种混合型断口，常见于塑性材料的拉伸试件上，断口的中心部分经受平面应变断裂，而周围区域经受平面应力断裂。也称为杯形端口(或杯形和锥形断口)，因为其中一个相配的断口表面看上去像一个微型杯子——中心为平底的凹面而四周围着切变裂痕，而另一个断口表面看上去就像微型截头锥形。

cupellation(灰吹法、烤钵冶金法) 含有金和银的液铅氧化，由此生成氧化铅，从而将贵重金属从基体金属中分离出来。

cupola(冲天炉) 用于熔化金属特别是铸铁的圆柱形立式炉，并在加入的炉料中拌之以热燃料，通常为冶炼焦炭。

cupping(深挤压) (1)作为深拉工艺中的第一步。(2)棒料或线材经深度加工而形成的断口，即其一端出现杯状和其他锥形的断面。

cupping test(杯突试验) 用于确定金属薄板的塑性和强度性质的力学试验。它包括测量在发生断裂之前，零件所形成的最大深度变形。其试验的实施通常是将试件的边缘夹在一个圆环形的冲模上，随后用一个端部为半球形的冲头对试件进行延伸。也见 *Erichsen test(埃里克森试验)*、*Olsen ductility test(奥尔森塑性试验)* 和 *Swift cup test(斯维夫特深杯*

拉伸试验)。

Curie temperature(居里温度) 标记在铁磁性与顺磁性之间或铁电相与顺电相之间发生转变的温度。即所谓的居里点。也见*ferromagnetism(铁磁性)*和*paramagnetism(顺磁性)*。

curling(卷边) 将金属薄板的边缘卷成封闭或部分封闭的圆形环边。

current(电流) 单位时间里所输送的电荷。也叫电荷流。也见*current density*(电流密度)。

current decay(电流减弱) 在点焊、缝焊或凸焊过程中,焊接电流从尖峰幅值到较低数值受控减小,以免焊接熔核的过快冷却。

current density(电流密度) 从电极的单位表面积里流入或流出的电流。

current efficiency(电流效率) (1)在特定反应中的电化学当量电流密度与总的作用电流密度之比。(2)在给定的工艺中,为实现要求的结果所耗用电流的份额比例。在电镀中,为金属的沉淀或溶解所耗用电流的份额比例。

cut(foundry practice,造型作业) (1)(**型砂搅拌**)。用铲土机或刮板式的机器将型砂在地面上搅拌。(2)(**浇口型腔制作**)。在铸造的铸型中做出浇口的凹腔。(3)(**型砂侵蚀**)。当液态金属流经模型或型芯表面时造成的型砂侵蚀,以致最后造成铸件上的缺陷。

cut edge(切边) 通过切割、剪切或冲切得到机械剪切的棱边。

cut-off(casting)[切断(铸件)] 用砂轮或锯、电弧气割或乙炔气割,将铸件从浇口上切割下来。

cut-off(metalforming)[切断(金属成形件)] 安装在冲模或设备上的一副刀片(或者形成与插入的刀片起相似作用的经研磨的冲模截面),用于锻造工序完成后将锻件从棒料上截断下来。只能用于从较长的棒料上生产的锻件,而不是由单个锻坯、预切锻坯或落料毛坯生产的锻件。也见*blank(落料毛坯)*和*multiple(锻坯)*。

cutoff wheel(切割砂轮) 一种很薄的磨削砂轮,用于材料或工件的分割或切槽。

cutting down(打磨) 通过磨削除去金属表面的粗糙度或凹凸不平度。

cutting edge(切削刃) 切削刀具(如车刀、钻头或铣刀)上的刃口,它与工件在切削时形成一条接触线。

cutting fluid(切削液) 一种在金属切削时用的液体,可提高表面粗糙度、刀具寿命或尺寸精度。当其流经刀具和工件时,能减少摩擦、发热和刀具的磨损,并防止表面拉伤。它将热量从发热点带走,还起到把切屑冲洗掉的作用。

cutting speed(切削速度) 刀具与工件之间的相对运动沿主切削方向上的线速度或圆周速度。

cutting tip(切割喷嘴) 氧气割炬上喷出气体的零件。

cutting torch(arc)(电弧割炬) 空气碳弧切割、气体保护钨极电弧切割和等离子电弧切割中,用以控制电极位置、输送电流和控制气流的一种装置。

cutting torch(oxyfuel gas)(氧气乙炔割炬) 一种用于为由受控的乙炔气体燃烧所产生的预热火焰指引方向,并以此指引和控制切割氧气的装置。

cyanic copper(氰铜) 从含有复合离子的碱金属氰化物溶液中电沉积获得的铜,该溶液由一价铜和氰基构成,还有溶液本身。

cyanide slimes(氰化物泥) 细末状的金属沉淀物,是在用氰化物溶液从矿石里萃取出贵重金属时生成的。

cyaniding(氰化) 一种表面淬火的工艺,将铁质材料在含有氰化物的盐浴中,加热至下相变温度范围以上,使之在表面同时吸附碳和氮,通过扩散而形成浓度梯度。最后由淬火硬化完成工艺过程。

cycle(N)(循环周) 在疲劳过程中,作用载荷值周期性地重复其一个完整的顺序过程。也见*S-N curve(S-N曲线)*。

cycle annealing(规范退火) 一种按照预先制定和严密控制的时间-温度处理规范进行的退火工艺,以此得到特定的性质和显微组织。

cyclic load(周期性载荷) (1)重复加载,以至于在零件里规律性地再生应力,有时因此造成疲劳断裂。(2)一种其数值按照一种有规律的重复变化顺序而改变的载荷。

cylindrical grinding(外圆磨) 对旋转零件的圆柱形外表面进行磨削。

cylindrical land(圆柱形刃棱面) 刃棱面后角为0°的铣刀。

D

damage tolerance(损坏极限) (1)一种裂纹生长率的设计方法。在预期寿命的使用过程中,按损坏极限设计的结构件中的裂纹生长,不允许达到的临界大小。(2)零部件(如航天发动机)防止由于缩孔、裂纹或其他缺陷,在特定的使用期内引起失效的能力。损坏极限的研究在航天工业中得到广泛应用。

damping(阻尼)　一种同热量散发一样的能量消耗，它是由于材料或材料系统承受一种振荡式的载荷或移位而造成的。

damping capability(阻尼性)　材料借助其内摩擦将机械能转变为热量，以此吸收振动(循环应力)的能力。

daylight(压力机间距)　液压机的移动与固定工作台或台板在张开位置时，两者之间的距离。对于多台板压机则指的是相邻两个台板之间的距离，压力机间距是压制件/成形件提供一个从模型/模具里取出来的空间。

dc casting(直冷浇铸)　同 *direct chill casting* (*直冷铸造*)。

dead soft(极软化)　与全退火得到的最低硬度和最小抗拉强度相当的一种非铁合金和某些铁合金的回火处理。

dealloying(去合金化)　对固溶体合金的一种或多种组分的有选择性溶蚀。也称为部分或 *selective leaching* (*选择性溶滤*)。也见 *decarburization* (*脱碳*)、*decobaltification* (*除钴*)、*denickelification* (*除镍*)、*dezincification* (*除锌*) 和 *graphitic corrosion* (*石墨腐蚀*)。

deburring(去毛刺)　对工件进行挫削、打磨或将其放在一个装有带悬浮磨粒的液体介质的筒里进行滚动，以此除去金属零件的毛刺、锐棱或飞边。有时也称 burring(去毛刺)。

decalescence(相变吸热)　将铁或钢加热(过热)，使 α 铁转变为 γ 铁所伴生的一种现象，其表现为因温度的急速降低而导致金属表面发暗，这又是相变潜能被快速吸收所造成的。对照 *recalescence* (*相变再辉*)。

decarburization(脱碳)　因为含碳合金表面同与其相接触的介质中的一种或多种化学物质发生反应，从而使其表层的碳有所丧失。

decobaltification(除钴)　将钴从钴基合金或用钴粘结剂烧结的碳化物中有选择性地溶滤出来的腐蚀。也见 *dealloying* (*去合金化*) 和 *selective leaching* (*选择性溶滤*)。

decohesive rupture(溶散性断裂)　一种脆性断裂，只能看到很少的塑性变形或根本没有整体上的塑性变形，而且它并不是表面波纹断裂、劈裂或疲劳而引起的。这种断裂通常都是由一种活性介质或者独特的显微组织所造成的，而且几乎无一例外地沿晶界断裂。

decomposition(分解)　将一种化合物分离成为它的化学元素或组分。

decomposition potential (or voltage)(分解电位或电压)　分解电解槽中的电解液或其中的一种组分所必需的金属表面电位。

deep drawing(深拉)　利用强力使金属薄板在冲模之间进行塑性流动，从而凹形零件发生深度变形，通常不会使中厚板产生明显的变薄。

deep etching(深度腐蚀)　金相分析中特别是对钢所进行的宏观腐蚀，用于检查材料的整体特性，即是否存在诸如疤痕、锻造开裂、残留缩孔、裂纹和晶内偏析等缺陷。

defect(缺陷)　(1)材料的不均匀性，由于其产生给零件的有效应用造成不利的影响。(2)一种或多种的不均匀性，由于其性质或累积性效应(例如裂纹的总长度)，而使零件或产品无法满足最低的相关合格标准或技术指标。这个术语也被称为不合格度。也见 *discontinuity* (*不均匀性*) 和 *flaw* (*瑕疵*)。

defective(有缺陷的)　质量控制用术语，用于表述包含一个以上缺陷的一组产品或应用，或者指若干个程度较轻的缺陷，但结合起来也会使之不能实现预期的功能。

deflection(偏移)　在金属成形或锻造中，当一个压力机零件在力的作用下，相对于一条直线或一个平面发生的总偏离量。一般用于规定在按照预定载荷分布的额定功率下，相对于机身、导轨或框架所允许的弯曲量。

deformation(变形)　由于应力作用、热量变化、湿度变化或其他原因，造成零件体形的变化。按长度单位进行测量。

deformation bands(变形带)　在变形过程中，一个晶体的各部分经过不同的旋转形成方位各异的变形带，而且晶粒无一例外。

deformation limit(变形极限)　在拉制的过程中，当使拉伸件边缘变形所需要的载荷不断增大而超过拉伸件杯壁的承载能力时，其变形达到了极限。该变形极限[极限拉制比(limiting drawing ratio), LDR]定义为能够拉成杯形而不至于破坏的最大坯料直径与冲头直径之比。

degasifier(脱气剂)　一种加入液态金属后能去除可溶性气体的物质，否则这些气体在金属凝固时就要被封闭或截留在金属里面。

degassing(脱气)　(1)通过将一种化合物加入液态金属而引起的化学反应，以此去除金属中的气体。在这个操作过程中常常使用的是惰性气体。(2)适用于铝合金的一种助熔过程，在其过程中氮、氯、氯

与氮以及氯与氩借助于发泡，经由金属去除合金中所溶解的氢气和氧化物。也见*flux（助熔剂）*。

degradation（劣化）　材料的化学结构、物理性质或外观的一种劣变。

degreasing（脱脂）　从表面除去油脂。可以通过浸没在有机溶液中、使溶液蒸气凝固在零件需要清洗的表面上（蒸气脱脂）或将溶液喷洒在零件上等方法进行脱脂。

delayed yield（延迟屈服）　一种在应力的作用与产生相应的屈服点应变之间有着一定时间延迟的现象。

delta ferrite（δ-铁素体）　见*ferrite（铁素体）*。

Demarest process（迪马瑞斯特工艺）　一种流体成形工艺，利用一种经改进的橡胶鼓突冲头实现圆柱形或圆锥形零件的成形。先把该装有液压缸的冲头置入工件的内部，再将其放进模具，最后以液体压力扩张其冲头。

dendrite（枝状晶体）　一种具有树枝样子的晶体，当铸造金属缓慢地冷却通过其凝固范围时，呈现的特征最为明显。

dendrite powder（枝晶粉）　具有典型松树树枝形态的，通常起源于电解质的颗粒。

denickelification（除镍）　有选择性地使镍从含镍合金中溶滤出来的腐蚀。最常见到的是在清水中经过期使用的铜-镍合金。也见*dealloying（去合金化）*、*selective leaching（选择性溶滤）*。

density, absolute（绝对密度，真密度）　单位体积的固体材料所具有的质量。用 g/cm^3、kg/m^3 或 lb/ft^3 表达。

density ratio（密度比）　粉末压坯的测量密度与具有同样成分的金属绝对密度之比，通常用百分比表示。也称之为百分比理论密度。

deoxidation（脱氧）　从液态金属中去除过量的氧，通常都通过加入与氧具有强亲和力的材料来实现的。

deoxidation products（脱氧产物）　通过在液态金属中加入脱氧剂而生成的一些非金属杂质。

deoxidized copper（脱氧铜）　通过在熔槽里加入*deoxidizer（脱氧剂）*，如磷，用于去除氧化亚铜而得到铜。

deoxidizer（脱氧剂）　一种加入液态金属里能去除游离或化合氧的物质。

deoxidizing（脱氧）　（1）利用适当的脱氧剂去除液态金属里的氧。（2）有时也是指去除氧以外的其他一些不需要元素，为此需加入一些易于与之发生反应的元素或化合物。（3）在金属的精加工中，通过化学或电化学反应从金属表面去除氧化膜。

dephosphorization（脱磷）　从钢液中去除磷。

depolarization（去极化作用）　降低电极的极化作用。

deposit corrosion（沉积腐蚀）　在金属表面的不连续沉积物下面或周围所发生的腐蚀。也称之为泥敷腐蚀。

deposition efficiency（arc welding）［熔敷系数（电弧焊］　电弧焊里熔敷的金属重量与所消耗的焊料金属净重之比，剩下的焊料料头不计入内。

deposition sequence（熔敷顺序）　焊接金属熔敷逐渐增加的顺序。

depth of cut（背吃刀量）　对于一次切削零件，从工件上去除的材料厚度。

depth of fusion（熔入深度）　焊接过程中，熔化从熔融表面向基体金属或前一次熔焊的金属里所延伸的距离。

descaling（除鳞）　（1）将一些金属表面在高温下生成的厚氧化层除去。（2）利用化学或机械方法，将铸件表面的锈皮或覆盖物去除。

desulfurizing（脱硫）　通过适当的炉渣反应或添加合适的化合物将液态金属中的硫去除。

detonation flame spraying（燃爆火焰喷涂）　一种改型的热喷涂工艺，利用气体、氧气和涂层粉末材料的混合物的受控爆炸，使材料熔化并涂于工件表面。

detritus（屑粒）　见*wear debris（磨损碎屑）*。

developed blank（改进型坯料）　一种金属薄板坯料，由其制成的成品零件不需修整加工或只需最少的修整加工。

dewaxing（除蜡）　在失蜡造型中，将耗用过的蜡型从熔模或壳模上去除的过程，通常通过加热熔化掉，或用适当的溶剂溶解石蜡来实现。

dezincification（除锌）　有选择性地将锌从含锌合金中溶滤出来的腐蚀，并留下较为脆弱的铜或氧化铜表层。最常见的是在含有溶解氧的水里长久使用后的 w（Cu）低于85%的铜-锌合金。也见*dealloying（去合金化）*和*selective leaching（选择性溶滤）*。

diamagnetic material（抗磁材料）　规定的磁导率小于1的材料，故只受磁铁很弱的推斥作用。比较*ferromagnetic material（铁磁性材料）*和*paramagnetic material（顺磁性材料）*。

diamond pyramid hardness test（金刚石锥头硬度测试）　见*Vickers hardness test（维氏硬度试验）*。

diamond tool（金刚石刀具）　（1）金刚石的具有或成形轮廓为单刃的切削刀具，用于非铁或非金属材料

的精密切削。(2)用多晶体金刚石坯块制成的镶嵌件。

diamond wheels(金刚石砂轮) 一种磨削用砂轮，它是用热固性树脂、金属或经玻璃化的粘合剂，将经粉碎和磨细的工业金刚石粘结制成的。

diaphragm(膜片) (1)在电解槽的阴极和阳极空间里，从两者相互之间或两者的过渡空间处，进行分隔的一种具有多孔性或透气性膜板。(2)用橡胶或类似材料制成的通用性模具元件，用于容纳液压流体的成形腔里将压力传递给成形零件。

dichromate treatment(重铬酸盐处理) 一种铬酸盐的转化镀层，在沸腾的重铬酸钠的溶液里它生成在镁合金上面。

didymium(钕镨混合物) 一种由稀土元素钕和镨构成的天然混合物，常以准化学的符号 Di 表示。

die(模具) 一种工具，通常包含一个凹腔，以此使固体、液态金属或粉末金属按照该工具自身的形状初步成形。它应用于许多压力加工工艺(包括落料、拉伸、锻压和成形)、压铸以及未经烧结的粉末冶金压块的成形。压铸模和粉末冶金模有时也称之为模型。也见 *forging dies(锻模)*。

die block(模块) 常用经热处理的钢制成，在其上面加工或凿刻出所要求的型腔，以此用锻锤或冲床生产出闭合模锻件或金属板冲压件。在锻造中，模块常常是成对地使用，型腔的一部分在一个模块上，而剩下的部分则在另一个模块上。在金属薄板的成形中，阴冲模和阳冲头组合在一起使用。也见 *closed-die forging*(闭式模锻造)。

die body(模体) 粉末压制模中的静止或固定部分。

die casting(压铸) (1)在模具里生产的铸件。(2)液态金属用高压注入一金属模凹腔里的铸造工艺。也见 *cold chamber machine(冷室压铸机)* 和 *hot chamber machine(热室压铸机)*。

die cavity(模具凹腔) 模具经加工得到的凹腔，使锻件或冲压件按其形状成形。

die clearance(模隙) 相匹配的冲头与凹模之间的间隙，一般用单侧的间隙表达。也称为间隙或冲头-凹模间隙。

die cushion(模垫) 冲床附件，置于支撑板或模块的下面或里面，为冲压或锻压工序提供附加运动或压力，借助空气、油、橡胶、弹簧或它们的组合发挥作用。

die forging(模锻) 在模具特别加工的型腔里，按要求的形状和尺寸锻打成形的一种锻造。

die forming(模压) 固体或金属粉末通过被压入模具的凹腔里而成形。

die holder(模座) 用于安装模块的底板或底座，其上有孔或槽，以固定其在压力机的台面或 *bed(基座)* 上。

die impression(模具型腔) 模具上使锻件或冲压件成形的那部分表面。

die insert(镶嵌模) 一种较小的模具，它有锻件或冲压件的部分或全部型腔，并且固定在主模块上。

die life(模具寿命) 模具型腔的生产寿命，通常用在型腔磨损至超过其允差之前所生产的工件数量表示。

die lubricant(模具润滑剂) (1)用于模型和冲头工作表面的润滑剂，适用于拉伸、冲压和/或压铸。在粉末冶金中，有时在压制成坯块之前就将润滑剂混合于粉末里。(2)一种化合物，在锻造或成形过程中，将其喷洒、涂抹或以其他方法应用于模具表面或工件上，以减少摩擦。润滑剂还有利于零件从模具中脱离出来，并起到绝热的作用。也见 *lubricant(润滑剂)*。

die match(模具搭配性) 模具在安装上压力机冲床或其他设备之后，其相互之间对准的状况。

die opening (1)(**对焊极间距**)在电弧对焊或电阻对焊中两个电极之间的距离，一般在焊接开始前或在对接前电流回路刚刚形成时，以当时相接触的零件进行测量。(2)(**模膛**)粉末冶金的模型凹腔的入口。

die proof(模型样件) 模具型腔的压型，用于校验型腔的精度。

die radius(拉伸模模口圆角半径) 深拉模具的外棱圆弧半径，当深拉制品成形时，薄板在该处发生流动。

die set(模组) 由分别安装下模和冲头的模具机座和冲头模板组成的工装或工装夹具。

die shift(模具偏移) 当模具在一个锻压组装中安装完毕后，模具里一部分型腔与模具的其他相关部分没有很好的对准而发生的状况，从而造成锻压时的偏移，故必须控制条件在规定的公差范围之内。

die sinking(刻模) 模具型腔的加工，使其能生产出形状和尺寸都符合要求的锻件。

die stamping(冲压件) 金属板料零件的一般性术语，即零件是用模具在冲床上通过一道或多道工序的压制、成形和冲切而得到的。

die welding(模焊) 见优先选用术语 *forge welding(锻造焊接)* 和 *cold welding(冷焊)*。

differential aeration cell(浓差充氧电解槽) 一种电

解槽，其电磁力是由于一个电极上相对于另一个具有同种材料的电极上的空气(氧气)浓度差而产生的。也见 *concentration cell*(*浓差电解槽*)。

differential coating(双面差厚涂镀) 一种镀制品，在其一个表面上有规定的镀层，而在另一表面上只有较浅的镀层(例如热浸镀锌产品或电镀锡薄板)。

differential floatation(优先浮选法) 通过浮法将复合矿石分离成两种或多种有价值的矿产品和矿渣，也称为可选性漂浮。

differential heating(梯度加热) 有意在物体里形成一种温度梯度的加热，由此冷却后在物体内形成一种所要求的应力分布或不同性质。

diffusion(扩散) (1)将一种组分散布在气体、液体或固体里，并使各部分的成分都趋于均匀。(2)原子或分子在材料内部自发运动到新的场所。

diffusion aid(扩散辅料) 有时用于扩散焊接中的固体金属填料。

diffusion bonding(扩散粘结) 见优先选用术语 *diffusion welding*(*扩散焊接*)和 *diffusion brazing*(*扩散硬钎焊*)。

diffusion brazing(扩散硬钎焊) 一种硬钎焊工艺，即通过将金属加热至适当的温度，并且使用一种金属填料或液态金属填料形成金属之间的粘结。金属填料可以利用毛细作用进行分布，也可以放置或成形于结合表面。金属填料在基体金属中扩散到一定的程度，其接合处的性质就会发生改变，并接近其基体的性质。是否加压力可视情况而定。

diffusion coating(扩散镀层) 一种镀层工艺，它是通过以下之一的方法进行的：①用其他金属或合金涂镀在基体金属或合金上，并将其在适当的介质中加热至足够高的温度。②将基体金属或合金暴露在含有其他金属或合金的气体或液体的介质中，形成扩散或促使其他金属或合金扩散到基体金属中，从而改变其表面的成分和性质。

diffusion coefficient(扩散系数) 与在单位时间里通过单位浓度梯度扩散到单位面积上的物质数量成正比的一个参数。

diffusion welding(扩散焊接) 一种固态焊接工艺，它通过在高温下施以压力使结合表面发生连接。其过程并不包括宏观变形、熔化或零件的相对移动。在结合表面之间，是否填入固体金属填料(扩散辅料)可视情况而定。也见 *forge welding*(锻造焊接)、*hot pressure welding*(热压焊接)和 *cold welding*(冷焊)。

dilatometer(膨胀仪) 一种测量金属因温度或同素异形的因素变化而引起的线度膨胀或收缩的仪器。

dimple rupture(凹陷断裂) 断口分析用术语，用于描述由于沿断裂路径的微观孔隙的形成和连通而发生的一种塑性断裂。这种塑性断裂的断口表面，以高倍放大下观察时呈现出凹陷状，而且用扫描电镜观察，往往能清晰地鉴别到。

dip brazing(浸液硬钎焊) 一种硬钎焊，其需要的热量是由熔融的化学或金属浴槽提供的。当使用化学浴槽时，它可以作为 *flux*(*助熔剂*)起作用。而当使用熔化金属浴槽时，浴槽还能提供金属填料。

dip coat(浸渍涂料) (1)在熔模铸造的固体模型技术里，将一种特别细腻的陶瓷预涂层如同稀浆状直接涂敷在模型表面，以此复制到最高的表面光滑度。将这种涂层粘附于较为粗糙的、低廉的和具有透气性的熔模上，由此制成铸模。(2)在熔模铸造的壳体模型技术里，将一种特别细腻的、称之为底面涂料的陶瓷涂层如同稀浆状直接涂敷在模型表面，以此复制到最高的表面光滑度。继此底面涂料之后，再涂敷其他不同粘度和不同等级的陶瓷颗粒的浸渍涂料。每次浸渍之后，用较为粗糙的撒砂撒于尚未干燥的涂层上。经过若干次的涂料涂敷后，就形成一个熔模壳体铸模。也见 *investment casting*(*熔模铸造*)。

diphase cleaning(双相清洗) 在清洗油罐中，利用能生成双相(即亲油相和亲水相)的乳化剂将污物去除。其清洗是通过溶解和乳化两种方式起作用的。

dip plating(浸镀) 同 *immersion plating*(*浸入式电镀*)。

dip soldering(浸焊) 一种软钎焊工艺，即由熔化金属槽供给所需要的焊接热量，并由其提供软钎焊的金属焊料。

direct chill casting(直冷铸造) 通过将金属浇入短模型里的一种连续浇铸，用于轧制或挤压钢锭的生产方法。模型的基体作为一个随着金属凝固而逐渐降低的平台，而凝固的金属壳起到一种容纳模型壁下液态金属的作用。通常随着钢锭的降低，用水直接喷洒在模具上或固体金属外壁上使之冷却。钢锭的长度是受其平台能够降低的深度所限制，因此常常也称之为半连续浇铸。

direct current arc furnace(直流电弧炉) 只有一根电极位于炉顶中心作为其系统阴极的电弧炉。电流从电极通过炉料或熔池到达位于炉底的阴极。然后电流从炉底通过耐熔材料到铜底板外接电缆。应用于铁合金、碳钢和合金钢，以及不锈钢的生产。也

见 *arc furnace*（电弧炉）。

direct current electrode negative（直流负极焊，DCEN） 直流电弧焊的电线接法为工件正极，而电极为焊弧负极。也称为直极。

direct current electrode positive（直流正极焊，DCEP） 直流电弧焊的电线接法为工件负极，而电极为焊弧正极。也称为逆极。

direct current reverse polarity（直流逆极，DCRP） 见 *direct current electrode positive（DCEP）（直流正极焊）*。

direct current straight polarity（直流直极，DCSP） 见 *direct current electrode negative（DCEN）（直流负极焊）*。

direct（forward）extrusion（直接挤压加工） 见 *extrusion（挤压加工）*。

directional property（取向性特性） 该特性的大小值变化取决于在金属内部，其试验的轴线与某特定方向之间的关系。这种变化是由其优先取向或其组分（或杂质）的纤维化所造成的。

directional solidification（定向凝固） 指铸造中液态金属的可控性凝固，以便为铸件的凝固前沿提供补给金属。

direct quenching（直接淬火） （1）零件经过渗碳后直接进行淬火。（2）也用于珠光体塑性零件在退火处理后直接进行淬火。

discontinuity（不连续突变） （1）一个零件中在正常的物理组织或结构上所发生的任何突变，如裂缝、皱皮、疤痕、杂质或疏松。这种突变有可能影响零件的均匀一致性。（2）焊接件的正常组织遭到突变，例如材料或焊接件的力学、金属学或物理特征发生一致性的缺失。然而一种突变并不一定就是一种缺陷。也见 *defect（缺陷）*和 *flaw（瑕疵）*。

discontinuous precipitation（断续沉淀） 从过饱和固溶体中沉淀出来的一种沉淀，其沉淀颗粒通过短程扩散而得以增长，并伴之以沉淀区域的基体组织的再结晶过程。断续沉淀从靠近晶界的沉淀核向基体中生长，并由沉淀物与经沉淀后剩下（和经再结晶的）的基体形成交错层状的组织。常常也称之为格状沉淀或结状沉淀。与 *continuous precipitation（连续沉淀）*和 *localized precipitation（局部沉淀）*相比。

discontinuous yielding（断续屈服） 金属因不均匀的塑性流动而出现的一个屈服点，期间所发生的塑性变形沿标准长度进行不均匀地分布。但在某些情况下，无论在开始还是在其流动的过程中，它的发生都显示不出明显的屈服点。

dishing（表面凹陷） 形成一种浅凹坑形的表面，其面积比深度要大。

disk grinding（圆盘磨削） 用盘状砂轮或切断砂轮的侧平面进行的磨削。也称立式平面磨削。

dislocation（位错） 在晶格的原子排列上的一种线性缺陷。有两种基本形态：①边缘位错，相当于失衡的原子，在晶体内部沿着由多余、不完整的原子平面而构成的边缘上的排列。②螺旋形位错，相当于晶体内螺旋结构的晶轴线，作为其特征的扭曲变形将正常的平行平面交叉在一起，以此形成的一种围绕着扭曲变形的连续螺旋斜面（以晶面间的距离为其节距）。大多数情况都是所谓的混合型扭曲变形，只不过是边缘位错与螺旋形位错的一种组合。

disordered structure（无序结构） 一种固溶体的晶体结构，里面不同元素的原子相对于相应处的晶格格点位置成无规则的分布。对照 *ordered structure（有序结构）*。

disordering（无序排列） 形成的一种晶格排列，其中固溶体的溶质和溶剂原子随机地占据晶格的格点位置。也见 *superlattice（超晶格点阵结构）*。

dispersing agent（分散剂） 一种能通过主要颗粒的散凝（悬浮）作用提高悬浮颗粒在液体介质中稳定性的物质。

dispersion hardening（分散硬化） 见 *dispersion strengthening（分散强化）*。

***dispersion-strengthened material*（分散强化材料）** 一种包含很细的分散的非金属物相的金属材料，例如 Al_2O_3、MgO、SiO_2、CdO、ThO_2、Y_2O_3 或 ZrO_2，以单独或组合的形式存在，从而提高金属基体的热强度。其例子包括用于焊接电极的分散强化铜（Al_2O_3）、用于电接触的银（CdO）和用于燃气轮机零件的镍-铬超合金（Y_2O_3）。也见 *mechanical alloying（机械合金化）*。

dispersion strengthening（分散强化） 通过加入化学稳定的亚微米大小的非金属相颗粒，使金属或合金得到强化。这种颗粒能阻止高温下的位错运动。

dispersoid（弥散体） 在某种金属合金的显微组织中，能观察到的相对难以溶解的组分的细分颗粒。

distortion（扭曲变形） 由于应力的作用或残余应力的释放，而引起的相对于原始尺寸、形状或轮廓的偏移。

disturbed metal（扰动金属） 在机械磨削或抛光过程中，在抛光表面形成的一种冷变形加工金属层。

divided cell（分离型电池） 一种电池，里面用一层薄膜或其他方法将 *anolyte（阳极）*和 *catholyte（阴极）*以物理的方式分隔开来。

divorced eutectic(断离状共晶体) 一种金相图像，其所示的共晶组织的两种组分呈现为较大的片状，而不像正常的共晶体那样具有细分混合特点。并且共晶体中的一种组分呈连续状，而且难以与其相伴的先共晶组分进行区分。

domain, magnetic(磁畴) 铁磁材料中的一种亚结构，在这种结构里所有的单元磁体(电子自旋)都因为原子间力而取向于同一方向，如果将其隔绝，则磁畴就成为饱和的永久磁铁。

double-acting hammer(双作用锻锤) 一种锻锤，蒸汽或空气通入气缸的活塞下方使锤头向上提升；而在锤头向下的冲程里，蒸汽或空气通入气缸的活塞上方，使锤头的下落得以增强。

double-action die(双工序模具) 一种模具设计成在一个冲压行程里完成一个以上的工序。

double-action forming(双工序成形) 在一个冲压行程里，完成一个以上的压形或拉伸工序。

double-action mechanical press(双工序机械压机) 该压力机利用双滑块，即让一个在另一个中滑动的方法，而具有两组相互独立又平行的运动。其内滑块或柱塞通常靠曲轴滑块驱动，而在拉伸过程中暂时处于静止状态的外滑块或落料滑块靠曲柄连杆机构或凸轮驱动。见 *slide*(滑块)。

double aging(双重时效) 为了获得所要求的性能，使用两次时效处理，以此控制从过饱和基体中析出的沉淀物的类型。第一次时效处理有时称为中间或稳定化处理，通常在比第二次更高的温度下进行。

double tempering(双重回火) 这是一种对淬火硬化的铁金属进行两次完整回火的处理，其目的是保证回火反应的完全进行和促成最终形成的显微组织的稳定性，两次处理采用的温度基本上是一样的。

double-welded joint(两面焊接) 任何从焊接件的两面都进行的电弧焊和氧气焊。

downgate(垂直内浇口) 同 *sprue*(直浇口)。

downhand welding(俯焊)

down milling(顺铣) 参见 *climb milling*(顺铣)。

downsprue(垂直浇口) 同 *sprue*(直浇口)。

Dow process(道氏炼镁法) 一种通过电解熔化氯化镁的生产镁的工艺。

draft (1)(**起模斜度**)。模型、芯盒、冲头或模具上(或其上零件)加工出的角度或锥度，以便将零件从铸模、或型腔中取出来、或型芯从铸件中取出来。(2)(**压缩量、减面率**)。在轧制或冷拉过程中，所发生的横截面的变化量或率。

drag(下型) 砂型、铸模或模型的下面部分。

drag(thermal cutting)(热切割中的后拖量) 在材料的氧气切割出口表面上进行测量时，其真实出口点相对于理论出口点的后移距离。

drawability(可拉性) 金属薄板在经受深拉的过程中，对其成形性的一种度量。该术语通常用于表示金属被深拉成形的能力。也见 *drawing*(拉拔)和 *deep drawing*(深拉)。

draw bead(拉伸调整杆) 在拉伸环或夹持表面上的插入杆或肋状凸台，其在深拉的工艺过程中用于控制金属的流动速度。在冲制不规则形状的冲压件时，用拉伸调整杆进行控制金属流动速度尤为有用的。

drawbench(拉拔机) 一种固定拉模并从端部拉拔材料的机床，用于拉制线材、盘条和管材。

draw forging(拉锻) 见 *radial forging*(径向锻造)。

draw forming(拉制成形) 一种将棒材、管材、或轧制或压延的型材弯曲成形的工艺方法，也就是使轧件绕着旋转的成形模块弯曲而成。先用成形模块夹住坯料，再将轧件挤压在成形模块与固定其周边上的压模之间，然后旋转成形模，这时坯料就被弯曲成形。

draw head(拉头) 安装于拉拔机上的全套轧辊或拉模，用于将带材、管材或实心坯料压制成型材。也见 *Turk's-head rolls*(互成直角的四滚轮拉丝模)。

drawing(拉，拉深) 用于表示各种不同的成形工艺，例如拉制金属薄板坯料、二次拉制管形零件，以及拉拔盘条、线材和管材。一般在冲床上用于金属薄板的拉制工艺，指的是以盘形金属薄板冲制杯形零件的方法，通过将薄板严密地夹持在坯料的夹持表面之间，以防止在冲头冲制时发生褶皱。

drawing compound(拉制润滑剂) (1)在拉制或冲压时，一种用于防止发生粘着和划伤的物质，这种物质可以避免工件与模具之间的金属对金属的直接接触。它也称为 *die lubricant*(模具润滑剂)。(2)在金属加工过程中使用的具有极压性质的润滑剂。也见 *extreme-pressure lubricant*(极压润滑剂)。

drawing out(延伸) 通过将工件沿其长度方向经过一系列的翻转锻造使之延伸的工序。

draw marks(拉痕) 见 *scoring*(划伤)、*galling*(擦伤)和 *pickup*(粘附颗粒)。

drawn shell(深度拉伸制品) 将金属薄板按照预定几何形态拉伸成为中空结构的物件。

draw plate(拉板) (1)在金属成形中，中心带孔的环形板，以便成形冲头能与其相配；在冲制过程中用于支承坯料。(2)在铸造中，装于模型上的一块

板，造型时便于将模型从型腔中拉出。

draw radius(拉伸半径) 模具或冲头棱角的圆弧半径，金属薄板将沿该圆弧拉过。

draw ring(拉延环) 一种环形的模具零件(模具自身上的环或与模具分离的环)，冲头借助拉延环拉制金属薄板的内边。

draw stock(延伸棒料) 一种锻造工序，一块金属(毛坯)长度的增加是以其截面积的缩小为代价的，在此过程中锻件不必翻转。该工序利用V形、圆形或扁形模将钢锭压成棒材。

dressing(砂轮修整) (1)对砂轮表面的切断、分割或非金刚石修整，以此提高砂轮的磨削能力和精度。(2)把砂轮表面钝化了的砂粒去除，以此恢复砂轮的磨削质量。

drift(斜铁) (1)一种宽度上带斜度的扁铁，用于将锥柄的钻头或其他工具从其锥套中退出。(2)一种带锥度的圆杆，用于将不同轴的孔对齐，以便于进行铆接或螺栓连接。有时也称为锥销。

drilling(钻孔) 利用一种具有一条或多条的刃口，以及一个或多个螺旋形或直形的槽或管，让切屑从中排出并同时让切削液进入，以能旋转的端部切削工具进行的孔加工。

drop forging(落锤模锻) (1)锻件的获得是通过锤击处于一对密闭的模具中的金属，使之按照落锤下的精整型腔内部形状成形。(2)每一形状都要求使用其专用模具的锻造方法。

drop hammer(落锤) 此术语通常指利用重力、蒸汽或压缩空气提供锻造能量的锻锤。也见 *air-lift hammer(空气提升锤)*、*board hammer(夹板锤)*和 *steam hammer(蒸汽锤)*。

drop hammer forming(落锤成形加工) 一种成形工艺，是在重力落锤或动力落锤的反复锻击下，使金属薄板在相配的模具中逐次变形而完成的。这种工艺仅限于变形相对较浅的零件和厚度介于0.6~1.6mm(0.024~0.064in)之间的薄板。

droplet erosion(滴蚀) 由液滴冲击固体表面而造成的腐蚀磨损。也见 *erosion(冲蚀)*。

drop-through(表面凹凸不平度) 不正常的凹凸或表面不平度，通常当采用接近基体金属固相线的硬钎焊或电焊时，会出现这种情况，这是因过热而在基体金属和焊料金属之间发生的快速扩散或合金化所造成的。

dross(浮渣) (1)在金属熔化表面上形成的浮渣，很大程度上是因为氧化，但有时是由于在熔化时杂质浮上表面所致。(2)在熔化的焊接表面上形成的氧化物及其他污染物。

dry corrosion(干蚀) 见 *gaseous corrosion(气蚀)*。

dry cyaniding(obsolete)(气体氰化，现已不再使用) 同 *carbonitriding(碳氮共渗，氰化)*。

dry sand mold(干砂型) 用砂子造成铸型，然后在使用以前以100℃(212℉)或以上的温度进行干燥。对照 *green sand mold(生砂型)*。

dry strength(casting)(干强度，铸造) 型砂造型试件的最大强度，让其在100~110℃(220~230℉)的温度下干透，再冷却至室温。即所谓的干粘结强度。

dual-phase steel(双相钢) 一类高强度低合金钢，其特征为抗拉强度值约为550MPa(80ksi)，其显微组织为大约20%(质量分数)的硬马氏体颗粒散布在软而可延的铁素体基体里。所谓双相特别指的是双相显微组织，即铁素体和马氏体。然而，还存在着少量的其他相，如贝氏体、珠光体或残留奥氏体。

ductile crack propagation(塑性裂纹扩张) 要求体外能量输入，使裂纹得以缓慢扩张，并伴随着明显的塑性变形。与 *brittle crack propagation(脆性裂纹扩张)*相反。

ductile fracture(塑性断裂) 以金属撕裂为特征的断裂，它伴随着相当明显的塑性变形及相当的能量消耗。与 *brittle fracture(脆性断裂)*相反。

ductile iron(球墨铸铁) 铸铁在熔化时，经过如镁或铈元素的处理，以促成团状或球状自由石墨的形成，正是这种石墨赋予铸铁金属以相当程度的塑性。即所谓的团状铸铁、球墨铸铁和球墨(SG)铁。

ductility(塑性) 材料发生塑性变形而不会引起断裂的能力。

dummy block(垫块) 在挤压的过程中，用一块厚的不固定的圆板垫在锤头和钢锭之间，用于防止锤头发生过热。

dummy cathode (1)(**波形假阴极**)。一种通常为波纹形的阴极，能产生可变的电流密度，以低电流密度对阴极进行电镀，将有助于去除电镀液中的杂质。(2)(**替代阴极**)。在对操作条件进行调整的过程中所使用的替代阴极。

duplex grain size(双重晶粒尺寸) 同时存在着相当多的两种晶粒尺寸，其中一种明显大于另一种。也称为混合晶粒尺寸。

duplexing(双炼法) 指任何双炉熔化或冶炼工艺。也叫双重熔化或双重冶炼。

duplex microstructure(双相显微组织) 一种呈两相的组织。

duplex stainless steels(双相不锈钢) 铁素体和奥氏体的细晶粒混合显微组织，其化学成分以26Cr-6.5Ni为中心。

duralumin(obsolete)(硬铝) 常用于指称一种经时效硬化的铝-铜合金，它还包含锰、镁和硅。

dusting。(1)(起尘化)。 一种会影响电动机的碳基电刷或其他载流接触器工作的现象，这时在低的相对湿度或高的作用电流密度的情形里，在运行中产生粉末状的"灰尘"。(2)(**涂撒**)。使用一种粉末(如硫)涂撒在熔化的镁上或石墨涂撒在模型表面。

dynamic(动态的) 动态的或具有很高的速度。常适用于金属样件的高应变率($>0.1s^{-1}$)试验。

dynamic creep(动态蠕变) 在载荷波动或温度波动的条件下发生的蠕变。

E

earing(压延件上边的凸耳) 在拉伸件的顶部形成的耳廓形或扇形边缘。这是因为轧制金属薄板在与其轧制方向成顺着、横着或一定角度的不同方位上存在着塑性冷轧特性的差异。

eccentric press(偏心压力机) 一种机械式压力机，其滑块的运动是依靠偏心轮而不是曲轴的原理实现的。

ECM *electrochemical machining(电化学切削加工)*的缩写。

eddy-current testing(涡流试验) 一种电磁无损检测方法，即在检测工件中感应生成涡流，由物体内的变异所引起其涡流的改变被反映到附近的一个或数个线圈里，再通过适当的仪器检测出这种变异。

edge dislocation(边缘位错) 见 *dislocation(位错)*。

edger(edging impression)(锻造模腔) 为了便于按照锻造的顺序依次将型腔的空间充满，在锻造过程中使金属分布到模具型腔中需要最多的部位。也见 *fuller(fullering impression)(压槽模、压槽型腔)*。

edge strain(边缘应变) 位于冷轧薄板或带钢边缘的，长度范围为25~300mm(1~12in)的横向应变线或吕德斯线。

edging(棱边加工) (1)在金属薄板的成形中，当冲头冲击后作少量的退回，此时压力尚未消除，以此可减小棱边上的圆弧半径。(2)在金属辊轧加工中，轧辊的轴线与沿其厚度的尺度相平行。也叫边缘辊轧。(3)加工棒料的锻打工序，工件在两次锻击之间翻转90°，该工序在两个轮廓成形模之间进行，以此生产出不同的矩形截面。(4)在锻造中，通常使用车床去除从两个模具之间挤出来的毛边。

EDM *electrical discharge machining(电火花切削加工)*的缩写。

effective crack size(有效裂纹大小) 由裂纹大小的实际增大而影响到裂纹尖端的塑性变形。有时候有效裂纹大小可通过计算得到，即实际裂纹大小的测量值加上塑性区调整计算值。一种计算有效裂纹大小的推荐方法为：将根据载荷偏移踪迹割线得到的弯曲量与根据同类样件标定得到的弹性弯曲量进行比较。

effective draw(有效拉伸) 通过多次冲压所能取得的最大成形极限，有时也称为最大拉伸或最大拉伸深度。

885℉(475℃) embrittlement(885℉(475℃)脆性化) 不锈钢由于持续地处于400~510℃(750~950℉)的温度之间而发生的脆性化。这种脆性化是由于在晶粒边界所偏析出的细微富铬沉淀物造成的，所处温度的时间直接影响偏析的量。富铬沉淀物在晶界的偏析可增加其强度和硬度，而降低其塑性和韧性，还会改变其耐腐性。这种类型的脆性化可以通过加热到发生沉淀的温度范围之上而得到逆转。

ejector(脱模器) 在模具上设置的一种使成形零件从模具中脱出或帮助其脱出的装置。

ejector half(顶销半模) 压铸模中带有顶销的那一半模具。

ejector rod(顶杆) 用于将成形工件推出的。

elastic constants(弹性常数) 将材料的弹性位移与其作用力关联起来的比例因子。也见 *bulk modulus of elasticity(体积弹性模量)*、*poisson's ratio(泊松比)*和 *shear modulus(切变模量)*。

elastic deformation(弹性变形) 同种物相在尺度上的变化与作用力的增大或减小成正比。

elastic hysteresis(弹性滞后) 作为滞弹应变的一个不够准确的术语，它是让应力作用的变化滞后，从而造成周期性加载中的能量损耗。更为合适的术语为 *mechanical hysteresis(机械滞后)*。

elasticity(弹性) 一种材料的性能，借此由应力引起的变形又因应力的撤销而消失。一种理想的弹性体会在应力撤销后，完全恢复其原来的形状和尺寸。

elastic limit(弹性极限) 材料能够承受的最大应力，当该应力被完全撤销后不会留下任何永久应变。当载荷足够大而引起塑性的或不可恢复的变形时，可以认为材料已超过其弹性极限。也见 *proportional limit(比例极限)*。

elastic modulus(弹性模量) 同 *modulus of elasticity*

(弹性模量)。

elastic ratio(弹性比) 屈服点除以抗拉强度。

elastic strain(弹性应变) 见 *elastic deformation(弹性变形)*。

elastic strain energy(弹性应变能) 通过外力的作用使物体发生弹性变形所消耗的能量。在弹性变形中，做的功几乎全部都被作为弹性能储存起来，当作用力撤销，这个能量就得到恢复。

electrical discharge grinding(电火花磨削) 在负极的砂轮与正极的工件之间进行放电磨削，其正、负极之间为含有绝缘流体(如矿物油)的小间隙。

electrical discharge machining(电火花切削加工，EDM) 通过在不同极性的电极之间的高速电火花放电将金属去除，其中一个电极置于工件上，而另一个电极置于与工件有 0.013～0.9mm(0.0005～0.035in)的间隙的工具上。在间隙中充满了绝缘流体和金属颗粒，这些颗粒在部分汽化中熔化，并且从间隙中发射出去。

electrical discharge wire cutting(电火花线切割加工) 一种特殊形式的电火花切削加工，其电极是一根连续移动的导线。也称之为移动导线放电切削加工。

electrical disintergration(电粉碎) 通过在空气中的电火花作用将金属去除。它不受精密控制，其最普通的用途就是清除断掉的刀头，如丝锥和钻头。

electrical pitting(电点蚀) 界面放电而造成金属腐蚀，从而形成表面失去金属的小凹坑。

electric arc furnace(电弧炉) 见 *arc furnace(电弧炉)*。

electric arc spraying(电弧喷涂) 见优先选用术语 *arc spraying(电弧喷涂)*。

electrochemical cell(电化学槽) 由浸没在电解液中，并处于金属接触的阳极和阴极构成的一种电化学系统。阳极和阴极可以是不同的金属，或同一金属表面上不相类似的部位。也见 *cathodic protection(阴极保护)*。

electrochemical corrosion(电化学腐蚀) 伴有金属表面上的阳极和阴极区域之间的电子流的腐蚀。

electrochemical discharge machining(电化学放电切削加工) 利用电化学加工与电火花加工两种工艺的结合进行金属切削。大部分的金属是通过阳极溶解而被去除(即 ECM 作用)。通过电解液的电解作用而形成的氧化膜是通过间断的电火花放电而去除的(即 EDM 作用)。因此说是两种作用的结合。

electrochemical equivalent(电化当量) 通过单位电量跨越两极，而以 100% 的效率被氧化或被还原掉的一种元素或一组元素的重量。通常用 g/C 表示。

electrochemical grinding(电化学磨削) 利用除镀层方法将金属去除的工艺。工件是阳极，而阴极是一个导电的氧化铝-铜或用金属粘结磨粒的金刚砂轮。大部分的金属都是用除镀层方法去除的，而只有 0.05%～10% 的金属是借助于磨粒切削去除的。

electrochemical machining(电化学切削加工，ECM) 利用阳极熔化进行受控金属去除。直流电穿过由导电溶液形成的处于工件和电极工具之间的隔离流膜。工件是阳极，工具为阴极。

electrochemical potential(电化学电位) 一种组分的总电化学自由能对于该组分的克分子数的偏导数，其组分里的所有因子都保持常数。一种组分的电化学电位与其化学位能相似，所不同的是其自由能除化学位能外还包含有电位。在一种电解液中，相对于参考电极的电极电位都是在开回路的条件下测量的。

electrochemical reaction(电化学反应) 当电流穿过含有游离离子的介质(如在电介作用中)时所发生的反应，或者能引起电流进入这种介质(像在原电池中)以外的一个导电体里的一种自生反应。无论作为哪一种情况都要借助于一对电极与电路的外面部分进行电联接。也见 *electrolyte(电解)*。

electrochemical series(电化序) 同 *electromotive force series(电动势序)*。

electrode(电极) 在电弧炉、电弧灯管等内，用于传导电流的压缩石墨或碳的圆柱体或圆棒。

electrode(electrochemistry)(电化学中用电极) 一对安装在电化学电池里的导体中的一个，在两根电极之间的介质中的离子分别向相对的方向流动，同时在它们的表面发生反应(这时电极外面进行适当的连接)。在直流电的运行过程中，一个电极或"极"以正电荷充电，而另一方以负电荷充电。也见 *anode(阳极)*、*cathode(阴极)*、*electrochemical reaction(电化学反应)* 和 *electrolyte(电解)*。

electrode(welding)(焊接用焊条) (1)在电弧焊中的载流棒，由其支承它与工件之间的电弧，或者作为双碳弧焊的两个碳棒之间的电弧。它是否提供金属填料可视情况而定。也见 *bare electrode(裸焊条、无药焊条)*、*covered electrode(涂料焊条)*、*flux cored electrode(熔芯焊条)*、*lightly coated electrode(轻质涂层焊条)*、*metal electrode(金属焊条)* 和 *stranded electrode(绞合焊条)*。(2)在电阻焊中，电阻焊焊机上的一个零件，电流、大部分情况下还有

压力都经过它直接作用于工件。焊极可以做成旋转轮、旋转辊子、棒、圆柱体、平板、夹子、卡头及由其改进的各种形式。(3)电弧和等离子喷涂中的载流元件，由其支持电弧。

electrode cable(焊条电缆,电极导线) 同 *electrode lead(焊条导线)*。

electrode deposition(电焊堆积) 从单位长度的焊条上获得的焊接金属堆积重量。

electrode extension(焊条延伸段) 对于气体保护金属极电弧焊、熔芯焊以及埋弧焊，从接触管端部延伸至未能熔化的焊条长度。

electrode force(焊条作用力) 在焊点、焊缝处，焊条与凸焊之间的作用力。

electrode holder(焊条夹钳,电极夹具) 接通电流时，用于机械地夹持焊条的装置。

electrode indentation(resistance welding)(焊点压痕) 由电阻焊的电极在工件表面留下的凹痕。

electrode lead(焊条导线) 连接电弧焊电流源与焊条夹子之间的导线。

electrode polarization(电极极化) 电极电位相对于参照值的变化。例如这种变化可以是由外加电流，或者是由氧化剂或还原剂的加入而引起的。

electrodeposition(电沉积) (1)通上电流后，从电镀溶液中沉积下来的导电材料。(2)当电流通过电解液时，在电极上留下的沉积物。电镀、电成形、电精炼及电孪晶作用都是由电沉积所致。

electrode potential(电极电位) 在电解作用中，相对于参照电极所测量得到的电极电位。电极电位并不包括任何在溶液或外部电路里电阻上的电位损耗。它代表了将单位电荷从电极表面通过溶液移动到其参照电极的可逆功。

electrode reaction(电极反应) 相当于在电子和离子导电体间输送电荷的界面反应。也见 *anodic reaction(阳极反应)* 和 *cathodic reaction(阴极反应)*。

electroforming(电铸) 通过在一种可撤除模型上的电沉积制造零件[通过电解使金属沉积在铸模上制造或复制金属制品的过程(铸模与金属沉积物能够分离)——译者注]。

electrogalvanizing(电镀锌) 在铁或钢的表面进行的电镀锌。

electrogas welding(气电焊,EGW) 一种电弧焊工艺，用连续焊料焊条与工件之间的电弧进行加热。垂直位置焊接时，利用模瓦限制熔化了的焊接金属。其焊条可以是熔芯或实心的。是否用外供气体或混合剂进行保护可视情况而定。

electroless plating(化学镀,化学沉积) (1)一种利用自动催化的化学还原，将稀释水溶液中的金属离子涂敷于金属基体上的工艺。(2)不用施加电流，由自动催化的镀层溶液产生导电材料的沉积。

electrolysis(电解,电解作用) (1)因电流通过电解液而发生的化学变化。(2)让电流通过电解液进行化合物或化合混合物的分离。

electrolyte (1)(电解质)。一种化学物质或混合物，通常为液体，它含有能在电场里游弋的离子。(2)(电解)。一种化合物或多种化合物的混合，当其熔化或在溶液里时可以导电。

electrolytic brightening(电解光亮化) 同 *electropolishing(电抛光)*。

electrolytic cell(电解槽) 由一个容器、电极和电解液组成的装置，以此进行电解。

electrolytic cleaning(电解清洗) 一种从金属表面去除污物、锈皮和腐蚀物的方法，将其作为电解槽里的一个 *electrode(电极)* 通上电流，以此实现其表面的清洁。

electrolytic copper(电解铜) 通过电解沉积对铜进行精炼，包括阴极(即精炼的直接产物)、阴极经熔化后的精炼铸锭以及此后再经过延伸、加工而成的产品。通常单独使用这个术语时，它指的是韧铜(火精铜)，除了有相当的含氧量存在外，它不含有其他的元素成分。也见 *tough pitch copper(韧铜)*。

electrolytic deposition(电解沉积) 同 *electrodeposition(电沉积)*。

electrolytic grinding(电解磨削) 磨削与电解切削的一种结合，一般以金属粘结的金刚砂磨轮为阴极与作为阳极的工件进行接触，这种接触处于一种适当的电解液表面之下。进行磨削的磨粒起到一种绝缘间隙的作用，以便能在电解同时进行切削。

electrolytic machining(电解切削) 受控的金属去除，通过施加一电压和使用适当的电解液得到所要求的形状与尺寸。

electrolytic pickling(电解酸洗) 使用电流进行酸洗，工件作为其中一个电极。

electrolytic polishing(电解抛光) 一种电化学抛光工艺，被进行抛光的金属作为电解槽里的阳极，其表面形貌上的高凸点首先被消除掉，由此形成一种能像镜面一样反射的金属表面。参照 *electropolishing(电抛光)*。

electrolytic powder(电解粉) 通过电沉积或将电沉积物研磨成粉而得到的粉末。

electrolytic tough pitch(韧铜,火精铜) 表示一种以粗铜为原料的炼制方法，以期得到具有良好物理和电学等级的铜制成品。

electromagnetic forming(电磁成形) 一种直接使用强烈的、瞬态的磁场进行金属成形加工的工艺。工件成形时并没有机械接触，只是用电流脉冲穿过一个成形线圈。即所谓的磁脉冲成形加工。

electromagnetic radiation(电磁辐射) 能量由电磁场以光速发射传播。电磁光谱大致包括以下波长区：

波 长 区	波长/Å
γ-射线	0.005 ~ 1.4(0.0005 ~ 0.14nm)
X-射线	0.1 ~ 100(0.01 ~ 10nm)
远紫外线	100 ~ 2000(10 ~ 200nm)
近紫外线	2000 ~ 3800(200 ~ 380nm)
可见光	3800 ~ 7800(380 ~ 780nm)
近红外线	7800 ~ 30000(0.78 ~ 3μm)
中红外线	3×10^4 ~ 3×10^5(3 ~ 30μm)
远红外线	3×10^5 ~ 3×10^6(30 ~ 300μm)
微波	3×10^6 ~ 3×10^{10}(0.3mm ~ 1m)

electromechanical polishing(电机械抛光) 一种腐蚀抛光法，即抛光流体的化学作用通过在样件与抛光轮之间施加电流，而得到增强或受到控制。

electrometallurgy(电冶金) 利用电或电解的方法，进行工业上的金属和合金的再生和处理。

electromotive force(电动势) (1)决定电荷流动的力，电位差。(2)电位，电压。

electromotive force series(emf series)(电动势序) 元素按照其标准电极电位所排的一种序列，以"惰性"金属(如金)为正，以"活动"金属(如锌)为负。在腐蚀的一些研究中，通常利用金属模拟的、但更为实际的电势序。给定的一种金属在两个序列里的相对位置并不一定相同。

electron bands(电子能带) 自由电子在金属中的能量状态，正如电子结构的能带学说(能区理论)中所描述的。也称之为布里渊区(Brillouin zones)。

electron beam cutting(电子束切割) 利用主要由高速电子集束所形成的热量进行的切割工艺，即用于冲击被切割的金属；是否使用外供气体可视情况而定。

electron beam heat treating(电子束热处理) 一种可选用的表面硬化工艺，通过以加速电子流的直接轰击给表面快速加热。

electron beam machining(电子束切削加工) 用聚集电子流对准工件的某一点的冲击使之熔化并蒸发，以此实现材料的去除。这种切削是在高真空里进行的，这样可消除因气体分子的相互作用而引起的电子发散。电子束切削加工的最重要用途是钻孔。

electron beam welding(电子束焊接,EBW) 一种焊接工艺，利用主要由高速电子集束冲击需要连接的表面所产生的热量使金属融合在一起。

electrophoresis(电泳) 在电场中，带电的胶体或大分子材料的运送。

electroplate(电镀) 借助于电解作用在表面进行金属涂层的应用。

electroplating(电镀术) 粘附金属涂层在物体表面上的电沉积，通过阴极作用达到保护具有与基体不同性质或尺寸的表面的目的。

electropolishing(电抛光) 制备金相样件的通用技术，让样件作为电解槽里的阳极而得到高度的抛光，其间优先将高凸点消溶掉而使表面平滑。参照 *electrolytic polishing (电解抛光)*。

electrorefining(电精炼,电解提纯) 借助电或电解的方法将不纯金属变为纯净金属，或者利用不纯或部分纯化的原材料生产合金。

electroslag remelting(电渣重熔,ESR) 一种消耗电极的重熔工艺，让电流通过导电的炉渣而产生热量。金属熔滴通过与炉渣接触得到精炼。

electroslag welding(电渣焊,ESW) 一种焊接技术，利用能熔化金属焊料和工件表面的熔渣将金属连接在一起。焊接熔池由熔渣保护，随着焊接的进行，保护也沿着整个连接横截面移动。这个过程是从加热炉渣的电弧开始的。随后电弧被导电的炉渣所熄灭，而炉渣的熔化则由电流通过其电极和工件之间的电阻而得以维持。

electrostrictive effect(电致伸缩效应) 由某些晶体材料所表现的在弹性应变与电场之间的可逆性相互作用。应变的方向与场的极性无关。比较 *piezoelectric effect (压电效应)*。

electrotinning(电镀锡) 在物体上利用电镀镀锡。

electrotyping(电铸术) 利用电成形加工进行制版生产。

electrowinnning(电解冶金法,电积金属法) 利用电化学技术从矿石中回收金属。

elongation(伸长率) (1)在力学试验中，用于表述试件在拉力作用下所延长的量。(2)在拉伸试验中，试件断裂后在其标样长度内测量得到的标样长度增加量。通常表示为原始标样长度的百分比。

elongation, percent[伸长率(%)] 具有均匀截面的试件的伸长量，表示为其原始标样长度的百分比：

$$伸长率(\%)=\frac{(L_x-L_o)}{L_o}\times 100$$

式中，L_o是原始标样长度，L_x是最终的标样长度。

elutriation(淘洗法) 一种颗粒大小的测试方法，要测大小的颗粒悬浮在液体或气体中，较大的颗粒沉降下来被取出和称重，而经过一定的时间间隔后，较小的颗粒再被取出、收集和称重。

embossing(模压凸纹) (1)用于在塑性膜片或薄板上按照一定的图案样式压制出凹形的技术。这种模压的表面图案样式可以通过用照相制版或其他技术对压模表面进行的加工而成形在模压的零件上。(2)改进表面凸纹的设计。

embossing die(压凸纹模) 用于生产压制凸纹的模具。

embrittlement(脆性化) 指材料严重丧失塑性、韧性或其两者，一般为金属或合金。有许多形式的脆性化可以导致脆性断裂，并且多数发生在热处理或高温应用(热诱导脆性化)的过程里。其中一些脆性化形式会对钢造成影响，包括兰脆性、885℉(475℃)脆性化、淬火时效脆性化、σ相脆性化、应变时效脆性化、回火脆性化、回火马氏体脆性化以及热脆性化。此外，钢、其他金属及合金都会被环境条件脆性化(环境促使脆性化)。环境脆性化的形式又分为酸性脆性化、碱性脆性化、腐蚀脆性化、蠕变断裂脆性化、氢脆性化、液体金属脆性化、中子脆性化、软钎焊料脆性化和应力腐蚀开裂。

emf *electromotive force(电动势)*的缩写。

emission spectrocopy(发射光谱) 是光谱技术中的一个分支，原子、离子、原子基团和分子通过电磁辐射的发散，而形成光谱的理论、解释和应用。

emissivity(发射率,辐射系数) 从单位表面积上辐射的能量或高能颗粒数量与在同样条件下理想辐射源在单位面积上的辐射量之间的比值。

emulsion(乳化) 一种液体在另一种液体中稳定的分散状态，一般都借助于一种与连续相和断续相同时具有亲和力的乳化剂而形成的。乳化剂、断续相和连续相能够一起形成另一种相，作为一种包容(密封)保护相围绕在断续相的外面。

emulsion cleaner(乳化清洗剂) 一种借助于乳化剂将有机溶液分散于水性介质里而构成的清洗液。

enameling iron(搪瓷铁) 一种低碳、冷轧薄钢板，用于制作搪瓷的基体。

enantiotropy(互变性) 同种物质的晶体形态间的关联，其中一种形态稳定地处于某一温度之上，而另一种形态则稳定地处于该温度之下。例如，铁合金里的铁素体和奥氏体就是互变的。

end mark(终端标记) 在热轧或冷轧中，由薄板的尾端给轧辊留下的一种轧制标记。

end milling(立铣) 一种铣削方法，其旋转刀具的切削刃位于其端面及其周边。也见*face milling(端面铣)*和*milling(铣削)*。

endothermic atmosphere(吸热气氛) 由碳氢气体与吸热反应中的空气进行的不完全燃烧，而生成的一种气体混合物。即所谓的吸热气体(endogas)。

endothermic reaction(吸热反应) 专指或适用于吸收发热量的反应。

end-quench hardenability test(端部淬火淬硬性试验) 确定钢或其他铁合金淬硬性的试验方法，一般称为约米尼(Jominy)试验。其淬硬性的测试步骤为：加热标准样件至上临界温度以上，将热样件置于一夹具里让冷水水流朝其一端浇注，然后待完全冷却至室温后，沿其长度按规定间隔距离测出其表面附近的硬度，得到的数据以硬度对其离开端部的距离画出曲线。

endurance limit(寿命极限) 材料在承受无穷多的疲劳周数的条件下所能够接受的最大应力。也见*fatigue limit(疲劳极限)*和*fatigue strength(疲劳强度)*。

endurance ratio(持久比,耐久比) 一种给定材料的完全逆向弯曲应力寿命极限与其抗拉强度之比。

engineering strain(*e*)(工程应变) 为了与真实应变相区别，有时用它表示平均线性应变或常规应变。在拉伸试验里，它是用标样长度的变化除以其原始长度计算得到。

engineering stress(*s*)(工程应力) 为了与实际应力相区别，有时用它表示常规应力。在拉伸试验里，它是用作用于试件的断裂载荷除以试件的原始横截面积计算得到。

environmental cracking(环境开裂) 通常为塑性材料所发生的脆性断裂，这是由于材料所处环境中的腐蚀因素所造成的。作为通用性术语，环境开裂包括腐蚀疲劳、高温氢蚀、氢气孔、氢脆性化、液体金属脆性化、实心金属脆性化、应力腐蚀开裂以及硫化物开裂。过去曾用的以下与环境开裂有关的术语，现在都已经不用了：腐蚀性脆性化、延迟性断裂、季节性开裂、静态疲劳、逐步开裂、硫化物腐蚀开裂以及硫化物应力腐蚀开裂。也见 *embrittle-*

ment(脆性化)。

epitaxy(晶体取向生长) 一种电沉积或气相沉积的生长，其间在沉积中的晶体方向与其下面的晶体状基体中的晶体方向直接有关。

epsilon(ε) 一般用于标识铁合金系，如 Fe_3Mo_2、FeSi 和 Fe_3P 中常见的金属间、金属-准金属间以及金属-非金属间化合物的代号。

epsilon carbide(ε碳化物) 一种六方的密排晶格的碳化物，是在初始马氏体回火的第一阶段沉淀出来的。其成分相当于成分式 $Fe_{2.4}C$。

epsilon structure(ε结构) 一种类似密排相或电子化合物的结构，七价电子对四原子的比例。

equiaxed grain structure(等轴晶粒结构) 晶粒在所有的方向都有近似相等尺寸的结构。

equilibrium(平衡) 物理、化学、力学或原子平衡的动态状态，它表现为一种静止不变的状态。

equilibrium diagram(平衡图) 一种在热动态平衡状态下，表示合金系统中各相区的温度、压力和成分极限值的图形。通常在金属系统中，认为压力是常量。与 *phace diagram*(*相图*)相比。

Erichsen test(埃里克森试验、埃氏杯突试验、拉伸性能试验) 一种杯突试验，用于评价薄板材料的拉延性。其方法是用一个锥形或半球形的冲头压入样件，然后测量断裂时的凹坑深度。

erosion(冲蚀) (1)是由于表面与含有固体颗粒的流体接触时发生相对运动所造成的固体表面的材料损耗。流体中固体颗粒的相对运动近似平行于固体表面的冲蚀称磨料冲蚀，而近似垂直于固体表面的则称冲击或撞击冲蚀。(2)由于固体表面与流体、多组分流体、冲击流体或固体颗粒间的相互机械作用，而导致的固体表面原始材料的逐渐损耗。(3)由于放电(电弧)造成的电接触表面的材料损耗。也见 *cavitation erosion*(*气蚀冲蚀*)、*electrical pitting*(*电点蚀*)和 *erosion-corrosion*(*冲蚀-腐蚀*)。

erosion-corrosion(冲蚀-腐蚀) 在有流动的腐蚀性流体存在的情况下，包括腐蚀和侵蚀的共同作用，而造成的材料加速损耗。

erosivity(侵蚀性) 颗粒、液流或泥浆的积聚特征，通过相对运动而表现出对固体表面可能造成的侵蚀磨损。

etchant(腐蚀剂) 一种化学溶液，用于腐蚀金属，使之显露其表面的组织特征。

etch cleaning(腐蚀清洗) 通过溶解掉一些底部金属来清除污垢。

etch cracks(腐蚀裂纹) 存在着高表面残余应力的淬火钢表面，因为脆化酸的腐蚀而造成的浅表层裂纹。

etch figure(刻蚀图形) 在晶体表面由于化学腐蚀而形成的特征性痕迹，通常显示出平行于低指数结晶平面的一些小平面。

etching(刻蚀术) (1)使金属表面通过有选择性的化学或电解腐蚀处理，显示其组织图像，以满足金相观察分析的需要。(2)利用化学或电化学方法从金属表面去除强力附膜，使之适应后续的表面处理(如油漆或电镀)的需要。

eutectic(共晶体) (1)等温的可逆反应，一种液体溶液在冷却时转变为两种或更多种紧密结合的混合固体，所形成的固相数量与系统里的组分数量一致。(2)成分由相图中的共晶点代表的一种合金。(3)由相互混合的固体组分通过共晶反应，并常以片状或杆状的规则排列形式构筑而成的合金组织。

eutectic carbide(共晶碳化物) 是在凝固的过程中生成的碳化物，作为铁合金里一起参与共晶反应又互不相溶的各相中的一相。

eutectic melting(共晶熔化) 局部显微区域发生的熔化，其成分与系统的共晶成分相一致。

eutectic point(共晶点) 与两种或多种固相保持单变度平衡的一种液相成分，在其成分系列中属熔点最低的合金。

eutectoid(共析体) (1)等温的可逆反应，一种固溶体在冷却时转变为两种或更多种紧密结合的混合固体，所形成的固相数量与系统里的组分数量一致。(2)成分是由相图中的共析点代表的一种合金。(3)由紧密混合的固体组分通过共析反应形成的合金组织。

eutectoid point(共析点) 在冷却中经单变度转变成为两种或多种其他固相的一种固相成分。

exfoliation(剥落) 一种腐蚀，它从其产生处沿着与表面平行的平面横向发展，一般都是在晶界处形成腐蚀物，而造成金属从基体材料上成片地脱落下来。这种腐蚀最常见的是锻铝合金。

exogenous inclusion(外来夹杂物) 由于外部原因生成的夹杂物。如炉渣、铁渣、被夹入的模具材料以及耐熔材料都是属于这种外来的夹杂物。在大部分情况里这些夹杂物都可以用宏观或肉眼观察到。与 *indigenous inclusion*(固有夹杂物)相比。

exothermic(放热的) 以产生热为其特点。

exothermic atmosphere(放热气体) 在发热反应的过程中，碳氢气体与空气的不完全燃烧而生成的混合

气体。即所谓的 exogas(放热型气体)。

exothermic reaction(放热反应) 散发热量的反应，如燃料的燃烧或某些塑性树脂的化学处置。

expanding(扩张术) 用于增加杯形、壳形或管形零件的直径的工艺。也见 *bulging(扩胀)*。

expendable pattern(消失模) 在铸造过程中所用的消耗性模型。它通常是用石蜡(失蜡铸造)或膨胀聚苯乙烯(消泡铸造)制成的。

explosion welding(爆炸焊接) 一种固态焊接工艺，通过可控的爆炸实现连接，爆炸可使零件高速移动到一起，结果形成的连接区呈现出波纹的外观。

explosive forming(爆炸成形) 与传统的冲压成形不同的利用一次炸药量的爆炸所产生的成形压力，使金属零件获得其形状。也见 *high-energy-rate forming(高能快速成形)*。

extensometer(伸长计) 一种用于测量由于力的作用或撤消而引起给定标样长度改变的仪器。通常用于拉伸试验。

extractive metallurgy(提取冶金) 冶金技术的一个分支，是指将金属从其矿石中提炼出来的工艺。比较 *refining(精炼)*。

extra hard(超硬) 非铁和某些铁合金的一种回火，其特点是它们的抗拉强度和硬度数值约为从完全硬化到超弹簧钢板回火之间的三分之一。

extra spring(超弹性) 非铁和某些铁合金的一种回火，相当于差不多完全硬化以上的冷作硬化状态，超过这个状态的进一步冷作硬化将不能再有效地增加其强度或硬度。

extreme-pressure lubricant(极压润滑剂) 一种在严酷的工况条件下，使摩擦表面获得很高承载能力的润滑剂。极压润滑剂一般含有硫、卤族元素或磷。

extruded hole(挤压孔) 用冲头挤压成形的孔。先冲出一个光洁的孔，然后利用冲头挤压将原孔扩大，并形成凸缘。

extrusion(挤压加工) 挤压金属使之穿过小孔并发生塑性流动，用这种方法将钢锭或钢坯变形为横截面均匀一致的长段料。在向前(直接)挤压过程中，挤压模和顶杆在挤压坯料的两端，产品与顶杆沿同一方向运动，于是在挤压模和坯料之间形成相对运动。在向后(间接)挤压加工过程中，挤压模在坯料的压头一端，产品围绕顶杆(像干电池那样用气缸进行冲击挤压)或进入空心顶杆的中心并沿其反方向运动，也见 *hydrostatic extrusion(静压挤制)* 和 *impact extrusion(冲击挤制)*。

extrusion billet(挤压方坯) 作为 *extrusion stock(挤压坯料)* 使用的金属锭料。

extrusion defect(挤压缺陷) 见优先选用术语 *extrusion pipe(挤压缩管)*。

extrusion forging (1)(**挤压锻造**)。将金属挤入或通过一个挤压模的开口，迫使金属朝另外的方向流动。(2)(**挤压锻件**)。用上述工艺所制造的零件。

extrusion ingot(挤压钢锭) 用作挤压坯料的金属铸锭。

extrusion pipe(挤压缩管) 偶尔产生于挤压金属棒料的最后 10%~20% 部分的中心线状断续氧化物。这是在挤压的最后阶段，钢坯的外表氧化皮从钢坯的端部流入棒料中心而造成的。也叫 *coring(成核化)*。

extrusion stock(挤压坯料) 用于挤压成形的圆棒、棒材或其他截面形状的毛坯。

eyeleting(冲孔翻边) 薄板或钢板的开口处出现的材料转移，成为在表面上突出形成的毛边。

F

face(切削表面) 当切屑在形成时，在车刀刀尖上用以支承切屑的表面。

face milling(端面铣) 铣削一个与铣刀轴线相垂直的表面。

face-type cutter(端铣刀) 能直接安装在主轴前端并由其驱动的铣刀。

facing (1)(**车削端面**)。在切削加工中，通过工件旋转和刀具沿着其旋转轴线相垂直的方向做移动而形成的表面。(2)(**型腔涂层**)。在翻砂操作中，以干或湿的方式涂敷砂型或砂芯表面材料，以此可改进铸件表面质量。也见 *mold wash(铸型涂料)*。(3)(**耐磨性**)。用于耐磨粒磨损，见优先选用术语 *hardfacing(表面硬化)*。

failure(失效) 用于表示零件在使用中出现的下列情况：①完全无法运行；②还能运行，但是已不能满意地达到其需要的功能；③严重损伤，并到了已经不能可靠或安全地连续工作的地步。

failure mechanism(失效机理) 如腐蚀或疲劳等造成失效的组织或化学过程。

false brinelling(摩擦腐蚀) (1)固体轴承表面的损坏，其特征性压痕不是因为过载引起塑性变形造成的，推测是由于其他原因(如微动腐蚀)而造成的。(2)由于不断地反复冲击，导致金属表面的保护膜破裂，因此出现局部的蚀点，通常也有腐蚀剂的存在。一般其外观像是由冲击造成的，但是通常能看到腐蚀生成物。它很可能是由微动腐蚀造成的。当

有更为准确的术语可以描述时，就应避免使用这个术语。摩擦腐蚀(滚道微动磨损)与实际冲击剥落是可以区分的，因为在摩擦腐蚀中表面材料的去除会导致表面原始精加工痕迹的失去；摩擦腐蚀的痕迹边缘是非常清晰的，而由滚动体造成的压痕并没有清晰的边缘，而且在压痕的底部还有清晰可辨的精加工痕迹。

fatigue(疲劳) 在重复性或脉动性的应力作用下材料导致断裂的现象，此时其应力的最大值并未超过材料的抗拉强度。一般在疲劳失效发生时，其静态作用的载荷几乎产生不了任何能让人感受到的影响。疲劳断裂是一个渐进的过程，它始于细微的裂纹，这种裂纹在脉动应力的作用下伸长。

fatigue crack growth rate(da/dN)(疲劳裂纹扩展率) 在幅值为常数的疲劳载荷作用下的裂纹扩展速率，用裂纹经过每一载荷作用周期的延伸量表示，并可画成其相对于应力强度因数范围 ΔK 的对数曲线图。

fatigue failure(疲劳失效) 这种失效发生时，承受 *fatigue(疲劳)* 的试件完全断裂为两块或软化，要不然就因为加热或开裂而使其刚性明显降低。

fatigue life(N)(疲劳寿命) (1)试件在规定失效形式发生以前所承受的具有规定特征的应力或应变的循环周数。(2)在给定(应力或应变)的震荡条件下，使试件发生失效所要求的变形循环周数。也见 *S-N curve(S-N曲线)*。

fatigue limit(疲劳极限) 按照一个规定的应力循环数，预计会导致疲劳断裂发生的最大应力。最大应力值和应力的比值也应当予以确定。也见 *endurance limit(寿命极限)*。

fatigue notch factor(K_f)(疲劳刻槽系数) 在相同的材料及状态下，一个不刻槽试件的疲劳强度与刻槽试件的疲劳强度之比，两者的强度都是在同样的应力循环周数下测定的。

fatigue notch sensitivity(q)(疲劳刻槽敏感度) 于给定槽或孔的大小及形状对材料性质影响的估计；由 $q=(K_f-1)/(K_t-1)$ 表征，K_f为疲劳刻槽系数，K_t为应力集中系数。当 q 接近于1.0，则认为是完全槽敏感；如接近0，则为无槽敏感。

fatigue ratio(疲劳比) 疲劳强度与抗拉强度之比。平均应力和交变应力必须予以规定。

fatigue strength(疲劳强度) 在发生失效以前，对于给定的循环周数，材料所能承受的最大循环应力。

fatigue strength at N cycles(S_N)(循环周数为 N 时的疲劳强度) 从 S-N 曲线上确定的，当循环周数正好为 N 时会发生失效的应力假设值。于是，如此确定的 S_N值所处的条件与用于 S-N 曲线上的条件是相同的。通常在文献上提到的 S_N 值是指最大应力 S_{max}、最小应力 S_{min}或应力幅度 S_a的假设值，即在该应力的作用下，当达到 N 的应力循环周数时，样本中有 50% 的试件能保存下来，这时平均应力 $S_m=0$。这也是所谓的 *median fatigue strength at N cycles(N周的疲劳强度中值)*。也见 *S-N curve(S-N曲线)*。

fatigue-strength reduction factor(疲劳强度降低系数) 没有应力集中的零件或试件的疲劳强度与其有应力集中的疲劳强度之比。只有当应力范围以及零件或试件的材料、形状和大小都确定时，该系数才有意义。

fatigue striation(疲劳条纹) 在扫描电镜断口或疲劳断裂表面时，常常能观察到上面的一些平行线条。这些线条横向于局部裂纹的延伸方向，其相邻两条线之间的距离代表了每一周的应力变化期间裂纹向前的延伸量。

fatigue test(疲劳试验) 确定材料不发生损坏而能承受的交变(脉动)应力变化范围的一种方法。

fatigue wear(疲劳磨损) (1)由于周期性应力变化而引起的疲劳，从而使脱落的颗粒失去。(2)由于材料疲劳引起的断裂，从而造成固体表面的磨损。也见 *spalling(剥落)*。

faying surface(接触表面) 一个零件上与另一个零件接触的或为了与之连接而紧密贴近的配合表面。

feed(进给) 切削刀具或砂轮沿着或进入工件表面的速度，其前进的方向取决于所操作的类型。

feeder(feeder head, feedhead)(冒口) 铸造工艺中的冒口，即 *riser(冒口)*。

feeding (1)(浇铸)。在铸造中，将熔化金属倒入可以凝固的地方，通常以足够快的速度在液态金属前沿凝固之前填满型腔，并且补偿伴随凝固发生的任何收缩。(2)(进料)。将金属坯料或工件送入使用或处理的地方，如金属丝送进做消耗电极，带钢送入模具或工件送入装配线。

feed lines(进给线痕) 在切削加工或磨削加工表面出现的线形痕迹，其相邻线条的间隔距离就等于每一转或每一行程的 *feed(进给)*。

ferrimagnetic material(亚铁磁性材料) (1)一种宏观上具有与铁磁性材料相似的性质，但是微观上却类似于反铁磁性材料，即其中一些基元磁矩沿反向平行的方向而排列。如果这些磁矩有着不同的大小，最后材料则仍会有很大的磁化强度。(2)一种

不相等磁矩在相互间按反向平行方向排列的材料。其磁导率的大小与铁磁性材料的相同，但是将低于当所有的原子矩都沿同一方平行排列时的磁导率。在普通条件下，亚铁磁性材料的磁学性质与铁磁性材料十分相似。

ferrite(铁素体) (1)一种由多种元素构成的体心立方固溶体。除非另有指定(例如,铬铁素体)，其溶质一般都默认为碳。在某些平衡图上有两个被奥氏体区所分割的铁素体区域。靠下的区域为 α 铁素体，而靠上的区域为 δ 铁素体。如果没有指定，则 α 铁素体是默认的。(2)一种主要为游离碳的固溶体，其中 α 铁为溶剂且以体心立方的晶体结构为其特征。只有当含碳量十分低时，才能获得完全铁素体钢。在这种金属里，最为明显的显微组织特征是铁素体的晶粒边界。

ferrite banding(铁素体带) 按照加工方向排列的自由铁素体平行带，有时也称为铁素体条纹。

ferrite number(铁素体数) 一个适合于代表奥氏体不锈钢焊接金属中铁素体含量的标准化数值。该数值直接代替铁素体百分比或铁素体的体积百分比，并且通过 AWS A4.2 所规定的磁性试验测得。

ferrite-pearlite banding(铁素体-珠光体带) 铁素体和按平行于加工方向排列的细丝状或片状珠光体的不均匀分布。

ferrite streaks(铁素体条纹) 同 *ferrite banding(铁素体带)*。

ferrite grain size(铁素体晶粒大小) 钢的铁素体基体的晶粒大小。

ferrite malleable(可锻铁素体) 同 *malleable iron(可锻铸铁)*。

ferritizing anneal(铁素体化退火) 对刚浇铸成的灰铸铁或塑性(球墨)铸铁进行的一种处理，使其基体基本上成为铁素体。按其字义，必须规定它所要求的最终显微组织或采用的时间-温度处理规范。

ferroalloy(铁素合金) 一种含有足量的一种或多种其他化学元素的铁合金，这些元素作为添加剂加入液态金属，特别是在钢液或铸铁液里很有用。

ferroelectric(铁电现象) 一种表现出自发的电极化、磁滞和压电性质的晶体材料。

ferroelectric effect(铁电效应) 某些晶体会呈现的自发偶极矩现象(按照能呈现永久磁矩的铁磁性来类推,也可将其称之为铁电性)。非常像铁磁晶体，铁电晶体也常表现出若干居里点、磁畴结构和磁滞。

ferrograph(铁谱) 一种用于测定机械系统里润滑油中磨损颗粒的大小分布的仪器。该技术利用的是这些颗粒能被磁铁所吸附。

ferromagnetic material(铁磁性材料) 一种通常显示磁滞及饱和的现象，而其磁导率又取决于磁化力的材料。从显微上看，在称之为 *domain(磁畴)* 的空间范围里的磁元体是平行排列的。铁磁性材料的非磁性化条件是由于磁畴磁性化的整体中和作用而形成的，故形成零外界磁性化。

ferromagnetism(铁磁性) 由某些金属、合金、相变化合物(铁族)、稀土以及锕系元素表现的一种性质，在这些物质中的原子磁矩，在低于所谓居里温度的一定温度之下趋向于相同方向的直线排列。铁磁性的特征是一个磁化物体对另一物体的强烈吸引力。也见 *Curie temperature(居里温度)*。比较 *paramagnetism(顺磁性)*。

ferrous(铁) 主要组分为铁的金属材料。

fiber(纤维流线) (1)锻压金属表现为 *directional property(取向性特性)* 的特征，这种特征可以通过其纵向截面的腐蚀得到揭示或者显示为断口的纤维或木质形态。这主要是由金属连续不断地延伸而造成的，无论金属或非金属都是沿其加工方向延伸的。(2)经过一定的变形加工工艺，通常为拔丝以后，金属晶体呈现出的取向性图案。也见 *fibering(纤维化)* 和 *preferred orientation(择优取向)*。

fibering(纤维化) 在变形工艺过程中，内部晶界、二次相和夹杂物都特别沿金属流动的方向延伸和取向。

fiber metallurgy(纤维冶金) 用纤维或截成段的细丝制成固态物体的技术，是否有金属基体可视情况而定。其纤维可由非金属(如石墨或氧化铝)，或者由金属(如钨或硼)组成。也见 *metal-matrix composite(s)(金属基体复合物)*。

fiber stress(纤维应力) 通过截面上一个很小的区域(一个点或线)的局部应力，该应力不均匀地分布，如在弯曲载荷的作用下，该应力成为束状。

fibrous fracture(纤维状断裂) 当金属有足够的塑性而使得晶粒在断裂发生之前得以延伸，从而造成一种灰色的非晶状断裂。当在冲击试验中得到纤维状断裂，可以将其作为金属具有韧性的依据。也见 *crystalline fracture(晶体断裂)* 和 *silky fracture(丝光断裂)*。

fibrous structure(纤维状组织) (1)在经蚀的锻件断面上所显示的未必有害的层状组织，或断面上呈现的丝状外观。但不要与干净金属的丝状断口成塑性断口相混淆。(2)在可锻铸铁断面上所显示的嵌入

在铁素体中的熔渣纤维状组织。(3)在轧制的钢板毛坯中的断口表面上出现的一种均匀、细化的晶粒组织，而没有层状或页岩型间断点。

filamentary shrinkage(细丝状收缩) 一种很细的网格状缩坑，偶尔可在铸钢件中发现，由此产生一种类似带状的X射线图像。

file hardness(锉刀硬度) 利用一把具有标准硬度的钢锉作为硬度的检测方法，该方法认为，当一种材料不能被锉削，则可认为它跟钢锉硬度一样或更高。这可以使用一套覆盖一定硬度范围的锉刀，最常用的锉刀就是其硬度经过热处理大约为67~70HRC。

filiform corrosion(丝状腐蚀) 发生在某些镀层下面、随机分布的螺旋状细丝样腐蚀。

filler metal(金属焊料) 在进行软钎焊、硬钎焊或弧焊连接时，添加进去的金属。也见 *brazing filler metal(钎焊金属填料)*、*electrode(welding)(焊接用焊条)*、*welding rod(焊条)*和 *welding wire(焊丝)*。

fillet(嵌条、圆角半径) (1)通常用于铸造截面交接处的凹角嵌条。也是这种连接处的金属的圆角半径，以此改变其突变形的角连接。(2)内接表面间的圆角(曲率)半径。

final annealing(最终退火) 不太精确的术语，用于指非铁合金在出厂前的最后一次退火。

final polishing(最终抛光) 一种抛光工艺，其主要目的为最后形成可以适用于金相观察的表面。

fineness(纯度,成色) 衡量金或银的纯净度，表示为千分之几。

fines(细粉料) (1)在筛选粉碎或磨碎的材料时，能够通过最细一个筛子的那部分材料。(2)一批或一堆的型砂中显著小于大部分颗粒大小的砂粒。(3)指粉末中颗粒小于规定大小[通常为44μm(325筛目)]的那部分粉末。

fine silver(纯银) 纯度为三个九(999)的银，即$w(Ag)$最低为99.9%，对其余量未作限制。

finish (1)(**表面粗糙度**)。金属的表面状况、质量及外观。(2)(毛坯加工裕量)。锻件或铸件在精加工中要被除去的余量。(3)(精整成形)。零件在精锻模里被锻造成最后形状的锻造过程。如果在精锻模里只进行一次锻造工序，则直接将其认定为精锻；如果在同一个精锻模里要进行一次或多次的锻造工序，则依次称之为第一、第二或第三精锻。

finish allowance(加工裕量) (1)一个成形零件的最终形状外围多余的金属材料，也称为锻件外壳、切削裕量或清除余量。(2)留在铸件或锻件表面的毛坯量。

finish annealing(完工退火) 适用于低或中碳钢经冷变形加工后的一种亚临界退火处理。作为一种折中处理，完工退火可以降低残余应力，并将引起切削加工变形的风险降低到最低限度，而保持了大部分因冷变形加工所具有的可加工性优势。*比较final annealing(最终退火)*。

finished steel(成品钢材) 已经完成作为方坯、初轧坯、薄板条、扁坯以及盘条的所有工序，并等待出厂的钢材。

finisher(finishing impression)(最终的模腔) 压制锻件最后形状的模具型腔。

finish grinding(终磨) 工件的最后一次磨削，以此达到其表面粗糙度和尺寸精度。

finishing die(终模) 最后一步锻造所用的一套模具。

finishing temperature(终结温度) 工件完成热变形加工时的温度。

finish machining(最终切削加工) 类似于 *finish grinding(终磨)*的切削加工。

firecracker welding(躺焊) 金属埋弧焊工艺中的一种变型，一长条涂料焊条沿着与工件接触的接头处放置，并在焊接过程中随着电弧沿焊条长度的移动，静止着的焊条逐渐被消耗掉。

fire-refined copper(火精炼铜) 仅使用火炉工艺进行炼制的铜，包括炼制的型材，制造厂家通过扩展将其加工成其他产品。通常当单独使用这个词时，指的是火精韧铜，它除了含有相当的氧以外不含其他元素。

fir-tree crystal(枞树枝状晶体) 一种 *dendrite(枝状晶体)*。

fisheye(白斑点) 钢的断口表面上具有白色结晶的形貌特征区域。

fisheye(焊接缺陷) 在钢的焊接断口表面上出现的一种断层，它是由小的、周围围绕着一种接近圆的明亮区域的孔隙或夹杂物组成。

fishmouthing(鳄鱼嘴) 见 *alligatoring(鳄纹开裂)*。

fishscale(鳞皮斑) 搪瓷涂层上的一种鳞片状外观，这是因为氢从基体金属(铁或钢)里逸出而造成搪瓷涂层与基体金属之间的粘附减弱。鳞皮有些像气泡，气泡的一部分沿周边发生破裂，余下部分仍沿其周边粘附在涂层上。

fishtail(鱼尾) (1)在轧锻过程中，锻件的多余材料形成的拖尾端。在尚未截除的后续锻造工序里常作为夹钳使用。(2)在热轧或挤压的过程中，棒材或特殊型材的不成形尾端，必须切除并作为轧制废料

废弃。

fissure(裂缝) 断口上像细微裂纹似的焊接断点，并仅有轻微的裂口(开口)。用术语字头 macro(宏观)和 micro(微观)表示其相对大小。

fixed-feed grinding(固定进给磨削) 砂轮在磨削时，以固定的步进或速度朝向或背离工件作进给运动。

fixed position welding(定位焊接) 将工件置于固定位置进行的焊接。

fixture(夹具) 为夹持零件而设计的装置，保证被连接的零件间有合适的相互关系。

flake(白点发裂) 产生于铁金属的一种短而断续的内裂纹，起因于热变形加工后的冷却过程中因为局部相变和氢溶解度效应而产生的应力。在断口表面上的这种发裂呈现为一种由光亮的、银白色的区域构成的粗糙织构。在经深度酸蚀的横截面上它们显示为一些间断点，通常都处在到其截面中心的一半位置上。也称之为发丝裂纹(hairline cracks)和由白点引起的发裂(shatter cracks)。

flake graphite(片状石墨) 片状的石墨碳，产生于灰铸铁的显微组织里。

flaking(剥落) (1)材料以片状或类似鳞形颗粒从表面脱落。(2)疲劳点蚀的一种形式。也见 *spalling(剥落)*。

flame annealing(火焰退火) 由火焰直接提供热量的一种退火。

flame cleaning(火焰清洁) 利用气体火焰清除金属表面的鳞屑、锈蚀、脏物和潮气。

flame cutting(火焰切割) 见优先选用术语 *oxygen cutting(氧气切割)*。

flame hardening(火焰硬化) 一种对可硬化铁合金表面进行硬化的技术，当用强烈的火焰加热表面层达到其相相变温度以上时，立即将工件进行淬火。

flame spraying(火焰喷涂) 一种热喷涂工艺，用氧气火焰作为熔化表面材料的热源。是否用压缩气体对基体上的表面材料进行雾化和喷涂可视情况而定。

flame straightening(火焰校直) 用气体火焰局部加热，校正金属结构中的变形。

flank(车刀的后面) 当车刀处于水平位置进行车削时，其刀头的端部接近切削刃，并在其之下的表面。

flank wear(后面磨损) 由于在切削过程中刀具与工件的接触摩擦，在刀具切削刃背面的后面与工件形成的后角不断减小，按照初始切削刃的线性尺度进行测量。

flare test(扩口试验) 一种用于管材的试验，包括将管口扩成圆锥形。类似于*pin expansion test(销扩试验)*。

flaring(卷边) (1)在管形零件上朝外扩出一个成锐角的凸缘。(2)利用液压头机的压头成形凸缘。

flash(披缝,飞边) (1)锻造过程中，按要求完全充满一对闭合或成形的锻模型腔后而多余的金属。披缝就是从锻件本体沿模具闭合处延伸而出的薄片，在后续的工序通过切边而去除。由于在锻造过程中披缝比锻件本体冷却得更快，于是它在模具闭合处起到阻止金属外流的作用，以确保模具型腔被完全填满。也见 *closed-die forging(闭式模锻造)*。(2)在铸造过程中，从相贴合的铸型表面溢出而成为一种金属翅片。(3)在焊接过程中，从其连接处排挤或挤压出来的材料，形成围绕其接缝的焊瘤。

flashback(回火) 火焰从焊枪或割枪倒回进焊枪混气室的现象。

flash extension(缝脊) 锻造零件经过切边之后遗留下来的金属部分，包含在正常的锻件公差之内。

flashing(闪弧) 在闪弧焊中周期性加热过程，是由一系列快速的重复局部短路，继之将熔化金属排开所构成的，在上述时间过程里焊接表面以预先设定的速度一步步向前延伸。

flash land(飞边带) 在合闭和形成锻模型腔时所设计的飞边形态，可以限制或容许溢料沿分型线上生成飞边。不管在何种情况下，必须确保填满整个型腔。

flash line(披缝线) 锻件在切边之后遗留下来的缝线。

flash plate(闪膜) 最后一层非常薄的金属电沉积膜。

flash welding(电火花对接焊) 一种电阻焊工艺，通过电火花作用并在加热后施加压力，以此实现对接零件结合表面之间的连接。当零件慢慢移向一起的时候，零件间小接触面上以非常高的电流密度所形成的电火花作用强制材料从接头处挤压出来。通过工件快速镦接而完成其焊合。

flask(型盒) 用于翻砂造型或容纳砂型的金属或木质框架。其上半部分称为 cope(上箱、型、模)，下半部分为 drag(下型)。也见*blind riser(暗冒口)*。

flat-die forging(平模锻造) 在平的或只有简单轮廓的模具之间，通过重复锻击和工件的翻动进行的锻造。即所谓的*open-die forging(开式模锻造)*、hand forging(smith forging)(手工锻打)。

flat drill(平钻) 一种旋转的、构成平头的端部切削

刀具，在其切削端部有与之相适应的切削刃口。

flat edge trimmer(平缘切边机) 为拉伸零件的凹凸口切边的机器。其滑块用凸轮驱动，故到达冲程的底部会有一短暂的闭模时间，有时称为横向滑模，通过其移动给零件切边。

flattening(压平) (1)作用于锻件毛坯使金属定位的初始工序，为后续工序作准备。(2)利用轧辊或延伸矫直机矫正薄板或中厚板的凹凸不平或变形。

flattening dies(压平模) 用于压平金属薄板的边缘，即模具通过闭合将折边压平。这种模具由平表面的上、下模组成，能将一个切边(突边)扣接另一个切边(卷边、缝边)。

flattening test(压平试验) 用于管材的一种试验，样件在两个平面之间被压至一定的高度。

flat wire (扁线) 一种基本上截面为矩形或正方形的轧制品，它比带材窄，而且其所有的表面都是经轧制或拉制而成的，预先也不经过任何的裁切、剪切或锯削。

flaw (瑕疵) 非特定用术语，用于指裂纹样的不均匀性。见优先选用术语 *discontinuity(不均匀性)* 和 *defect(缺陷)* 。

flexible cam(可变凸轮) 一种可调节的弹簧带钢压力控制凸轮，可以此在成形加工中周期性改变压力。

flex roll(弯曲轧辊) 一种可来回移动的轧辊，当将薄板通过辊子矫直机时用于推弯薄板。弯曲轧辊可以调整薄板的最大变形量为其辊子的直径。

flex rolling(弯曲辊轧) 为了减少在成形中出现拉伸变形的可能，让金属薄板通过一台弯曲轧机机组，最大限度地减少在屈服点的延伸量。

flexural strength(抗弯强度) 固体材料的一种承受弯曲或横向载荷的能力。

floating die(浮动模) (1)在金属成形加工中，模具或冲头安装在它们的夹具里所能有的微小移动量，用于补偿模具零件、工件及冲床的容许偏差。(2)安装在重载弹簧上的模具，在其切边、剪切或成形过程中可以有一些垂直移动量。

floating plug(浮动芯棒) 在管材拉制中，在模具里位于管子内的一根无支承芯棒；因而当用模具减小管子的外径时，其管壁厚度也随之减薄。

flop forging(翻动锻造) 锻造用的上、下模里的型腔是一致的，因此锻件可以在锻打过程中上下翻动。

flospinning(自旋成形) 利用动力绕一旋转芯轴自转而成形的圆柱形、圆锥形或曲线形零件。也见 *spinning(旋压成形)* 。

flotation(浮选法) 通过将磨碎的材料与水、油和浮选的化学物质一起搅拌，从矿石中富集有价值的矿物质。有价值的矿石一般都能为油所润湿，故能粘附于气泡并浮上表面，于是可将其进行漂离。

flow(流动) 材料单元体内的主平行面在切应力的作用下沿平行方向的移动(滑动或滑移)。以体积一定且不发生分裂为前提的材料上述状态的连续作用，称之为屈服、蠕变或塑性变形。

flowability(流动性) (1)在铸造中，型砂混料的一种特性，即使其能够在压力或振动下移动，从而使之与模型或芯盒中的所有表面紧密接触。(2)在焊接、硬钎焊或软钎焊中，焊料熔化、流动或涂敷金属表面的能力。

flow brightening(流动增亮) (1)电沉积物的熔化及之后的凝固，尤其指镀锡。(2)以化学或机械方式沉积于基体上的金属涂层的融结(熔化)，尤其适合于软钎焊。

flow lines(流线) (1)热或冷变形加工过程中，表明金属流动方向的纹理。流线往往通过金属零件表面或截面的腐蚀得到揭示。见伴随的宏观图像。(2)机械冶金学中，在变形过程中金属微量体积移动的踪迹。

flow stress(流动应力) 在固体金属里，产生塑性变形所要求的应力。

flow through(径流) 金属流动穿越筋肋基体，并造成晶粒结构破裂，以此形成的一种锻件缺陷。

fluid-cell process(流体囊工艺) 用于金属薄板成形的*格林工艺(Guerin process)*的改进型，流体囊工艺使用较高的压力，主要用于成形略微较深的零件，它用橡胶垫片做成模具或冲头。一种柔性的液压流体囊迫使橡胶垫片贴合在成形块的轮廓上，并且在工件所有的点上施加差不多均匀一致的压力。也见 *fluid forming(流体成形)* 和 *rubber-pad forming(橡胶垫成形)* 。

fluid forming(流体成形) 一种*格林工艺(Guerin process)*的改进型，流体成形工艺与流体囊工艺的不同之处在于被称为压力室的模具凹腔并不完全用橡胶布满，而是用杯形橡胶膜保留液压流体。也见 *fluid-cell process(流体囊工艺)* 。

fluidity(流动性) 液态金属流动并充满模型凹腔的能力。

fluidized bed(流化床) 当大量细微固体颗粒被包含并悬浮在流动的气体或液体里时，能像流体似的起作用。

fluorescent magnetic-particle inspection(荧光磁粉检测) 用于磁粉或悬浮在液体里的磁粉进行检测，被荧光材料包裹的粉末能增加检测图像的可见性。

fluorescent penetrant inspection(荧光渗透检测) 使用一种荧光液体渗入任何表面开口，然后将表面擦拭干净，于是通过在紫外线光下显示的荧光渗液遗留痕迹，就能检测出任何瑕疵所在的部位。

fluoroscopy(X射线荧光检测) 一种在荧光屏上目视分析标本的X射线图像的检测方法，正常情况下，只能用于低密度材料或截面很薄的材料，因为荧光屏所发出的光照应保持一种确保安全的低辐射强度。

flute(排屑槽) (1)当使用钻头、铰刀和螺丝攻时，其刀体上开出的沟或槽，以此形成切削刃口，并使切削液和切屑得以进出。(2)当使用铣刀或滚刀的时候，一个齿的背面与下一个齿的前面之间形成的容纳切屑的空间。

flutes(裂纹) 一些延伸的沟槽和空隙，通过它们将一些开阔的开裂平面连接起来。

fluting(开凹槽) (1)在圆柱形的零件上开出纵向凹槽，或在圆锥形的零件上开出径向凹槽。(2)当把薄板卷成圆柱形时，在其弧面上产生的一系列尖锐、平行的弯折或褶皱。(3)麻花钻或螺丝攻上磨削出的沟槽。

flux(助熔剂) (1)在金属冶炼中，加入金属熔液的一种材料，帮助熔化并能将不需要的物质，如砂子、灰分或脏物去除。金属熔液的助熔有利于那些不需要的组分形成团状，并从金属熔液里分离出来。它还能作为一种保护层覆盖在熔融金属的表面。一般在生铁熔化中用石灰或石灰石去除砂子，然而砂子在铜的冶炼中用于去除氧化铁。(2)在硬钎焊、切割、软钎焊或弧焊中使用的一种材料，旨在防止生成氧化物及其他不必要的物质，或者将它们溶解并予以去除。

flux cored arc welding(熔芯电弧焊,FCAW) 一种电弧焊工艺，利用连续的管状钎料与工件之间产生的电弧对要连接的金属进行加热。包容在管状熔化钎料心部的熔剂为焊接提供保护。另外还可由外界提供的气体或混合气体得到进一步的保护，有些情况也可以不用这种保护。也见 *flux cored electrode(熔芯焊条)*。

flux cored electrode(熔芯焊条) 一种复合金属填料焊条，是由管状或其他中空形状的金属和内填混合原料所构成的，起到保护气氛、脱氧、电弧稳定以及形成焊渣的作用。其心部可以含有微量的合金材料。其他的外部保护可视情况使用。

flux density(磁通密度) 磁学中，在单位面积上所通过的与之垂直方向的磁力线数量。它表达为：$B=\mu H$，式中 μ 和 H 分别为磁导率和磁场强度。

flux lines(磁通线) 用于解释磁场或其他场特性的假想线。它们的原理就是当把磁粉撒布在永磁铁上时，会形成的线型图案。有时也将其称为磁力线。

fly cutting(飞刀铣) 用单齿铣刀的切削。

flying shear(飞剪剪切) 用于按固定长度连续剪切轧制品的机器，其剪切过程无需中断轧制，而只需沿着输出辊道保持与产品相同的速度移动，然后当要剪切下一段时，又能及时回到剪切的起始点。

fog quenching(雾淬) 在蒸汽或雾汽中淬火。

foil(箔) 厚度小于0.15mm(0.006in)的金属薄板。

fold(叠皱) (1)一种金属缺陷。通常出现在表面或靠近表面，因为连续进行的表面重叠制造而造成。(2)一种锻造缺陷，因为当金属流向模具的凹腔时，金属被折向其自身表面。也见 *lap(重叠)*。

follow board(模板) 在翻造砂型时，需要使用的与模型相匹配的板。

follow die(连续模) 一种顺序模具，由一个夹板上的两个或多个零件组成，在两个或多个工位上，利用一个分离式下模，对一个零件进行一个以上工序(如冲孔和落料)的加工。

forced-air quench(压力空气淬火) 利用压缩空气强力喷射较小的零件，例如齿轮所进行的一种淬火。

forgeability(可锻性) 用于描述材料可以进行不发生断裂变形的相对能力。也可用于表示变形时发生流动的阻力。也见 *formability(成形性)*。

forged roll Scleroscope hardness number(HFRSc或HFRSd)(锻钢轧辊肖氏硬度值) 一个与金刚锤头落入锻钢轧辊回跳相对高度有关的数值。它是在将该锤头从允许最高硬度的锻钢轧辊上平均回跳高度分为100个单位的刻度上进行测量的。也见 *Scleroscope hardness number(肖氏硬度值)* 和 *Scleroscope hardness test(肖氏硬度试验)*。

forged structure(锻造组织) 在锻件适当截面上的宏观组织，以此揭示加工的方向。

forge welding(锻造焊接) 固态焊接，将金属在锻造(在空气中)过程中加热，然后施以足够的压力或火焰喷射，使其接合面发生永久变形。

forging(锻造) 借助锻锤、锻压机床(镦锻机床)、冲床、轧机或其他相关的成形设备的撞击或压力，将金属加工成为所要求形状的一种工艺。锻锤、上下模对于击锻锤设备和高能快速锻机都是利用对工

件的撞击，而其余大部分类型的锻造设备都是利用挤压压力使毛坯成形。有些金属可以在室温下锻造，但是大部分还需要加热，以便产生更多的塑性变形。这里所定义的特种锻造工艺包括 *closed-die forging*（*闭式模锻造*）、*high-energy-rate forming*（*高能快速成形*）、*hot upset forging*（*热镦锻*）、*isothermal forging*（*等温锻造*）、*open-die forging*（*开式模锻造*）、*powder forging*（*粉末锻造*）、*precision forging*（*精密锻造*）、*radial forging*（*径向锻造*）、*ring rolling*（*圆环辊轧*）、*roll forging*（*辊锻*）、*rotary forging*（*摆动碾压*）以及 *rotary swaging*（*回转模锻*）。

forging billet（锻造方坯）　作为锻件毛坯使用的可锻金属锭块。

forging dies（锻模）　用于制造锻件的成形。它们一般由上模与下模构成。最简单的就是用单一型腔成形一个完整的锻件。最复杂的锻模由多个压模嵌入件构成，其多个型腔可用于复杂形状的顺序加工。锻模通常都是成对使用的，型腔的一部分在其中一个模块里，而其余部分就在另一个模块里。

forging envelope（锻造裕量）　见 *finish allowance*（*加工裕量*）。

forging ingot（锻造锭块）　作为锻件毛坯的铸造金属锭块。

forging machine（upsetter 或 header）（锻造机，镦锻机或镦头机）　一种与 *mechanical press*（*机械压力机*）有关的锻造设备，其主要成形能量是以水平方向作用于工件，工件在镦锻前由模具夹住和固定。也见 *heading*（*镦头*）、*hot upset forging*（*热镦锻*）和 *upsetting*（*镦粗*）。

forging plane（锻造平面）　锻造中，包含主模面且与锤头运动方向垂直的平面。当模具的分型面是平的，锻造平面就与分型线相重合。

forging range（锻造温度范围）　金属能被顺利锻造的温度区间。

forging rolls（锻轧辊）　用于棒料或方钢毛坯预成形的驱动轧辊，其上面有能引导工件的轮廓形状和沟槽。也见 *roll forging*（*辊锻*）。

forging stock（锻造毛坯）　在锻造中，适用于顺序改变其横截面的圆棒、棒材或其他型材。

formability（成形性）　金属通过塑性变形改变形状的难易程度。金属的成形性评价包括强度、塑性以及会造成断裂的变形量的测定。可加工性一词与成形性互换使用，然而成形性是指通过整体成形使材料改变形状。也见 *forgeability*（*可锻性*）。

form block（成形凸模）　一种工装，通常为凸形零件，并应用于金属薄板的轮廓成形，一般用于橡胶垫成形。

form cutter（成形刀具）　任何制成轮廓刃口或铲背凸轮形的刀具，以此在工件上加工出特定的形状。

form die（成形模）　一种以最小塑性流动使金属薄板毛坯成形的模具。

form grinding（成形磨削）　磨削时，其砂轮的切削面前有一个与之所要求的形状相吻合的轮廓。

forming（成形加工）　（1）仅使其形状或轮廓发生变化而无意改变其厚度，但是剪切和下料除外。（2）坯料或经剪切的薄板料在工装（模具）之间获取最终轮廓的塑性变形。金属成形工艺一般分类为体积成形和薄板成形。也称为金属变形加工。

forming limit diagram（成形极限图，FLD）　一种曲线图，其纵坐标为金属薄板开始收缩时的主应变，横坐标为相应的小应变。失效开始线将所有可能的应变组合分为两个区域：安全区（预计成形时不会发生失效）和失效区（预计成形时会发生失效）。

form-relieved cutter（铲背铣刀）　一种铣刀，在使用寿命里仅修磨其后面，而其原始形状的齿面一直保持不磨。

form rolling（成形辊轧）　通过热轧生产具有异型截面的棒料，但不要与金属薄板的辊轧成形或辊锻相混淆。

form tool（成形车刀）　一种单刃的、不旋转的刀具，可以是圆的或平的，用于在工件上加工出与之形状反向或逆向的对应体。

forward extrusion（向前挤压加工）　同直接挤压加工。见 *extrusion*（*挤压加工*）。

fouling（污垢）　一种累积沉积物。它包括海洋有机物在水下金属表面上的积累和生长，还包括换热管道上的累积沉积物（通常为无机物）。也见 *biological corrosion*（*生物腐蚀*）。

foundry（铸造厂）　生产金属铸件的生产企业或车间。

foundry returns（铸造回收物）　浇口、直浇口、横浇口、冒口以及废铸件等可以回炉重新熔化的金属材料。

four-high mill（四辊式轧机）　一种一般用于平轧制品的轧机，该机有两个大直径的支承轧辊，用于增强两个与产品直接接触的较小工作轧辊的刚性。无论工作轧辊还是支承轧辊都可作为被动驱动。比较 *two-high mill*（*二辊式轧机*）和 *cluster mill*（*多辊轧机*）。

four-point press（四点冲床）　一种其滑块由四连杆和

四曲轴、偏心轮或气缸驱动的冲床，主要优点是滑块角上受到的压力比较均衡。

fractography(断口分析) 通过比对特定的断裂表面照片对材料的断裂进行描述性分析。宏观断口分析要用到低倍的放大照片(<25 倍)，微观断口分析则要用到高倍的放大照片(>25 倍)。

fracture(断口) 一块金属发生破裂后所产生的不规则粗糙表面。也见 *brittle fracture(脆性断裂)*、*cleavage fracture(开裂断裂)*、*crystalline fracture(晶体断裂)*、*decohesive rupture(溶散性断裂)*、*dimple rupture(凹陷断裂)*、*ductile fracture(塑性断裂)*、*fibrous fracture(纤维状断裂)*、*granular fracture(粒状断裂)*、*intergranular fracture(晶间断裂)*、*silky fracture(丝光断裂)*和 *transgranular fracture(穿晶断裂)*。

fracture grain size(断裂晶粒尺寸) 通过将试件的断裂与一套标准的断口进行比较来确定晶粒的大小。对于钢，一般利用一个完全的马氏体试件，就能确定硬化深度及原奥氏体晶粒的大小。

fracture machanics(断裂力学) 通过定量分析作用应力、裂纹长度和试件或机械零件的几何形状来评价其组织特性。也见 *linear elastic fracture mechanism(线弹性断裂力学)*。

fracture strength(断裂强度) 断裂开始时的法向应力。由拉伸试验中断裂开始时的载荷和试件的原始横截面积计算得到。

fracture stress(断裂应力) 开始断裂时，在最小横截面处的实际法向应力。该术语通常用于无刻槽试件的拉伸试验。

fracture surface markings(断口表面痕迹) 通过断口表面特征的分析，确定断裂的起始部位和引起断裂的应力特性。

fracture test(断裂试验) 在试验中让试件发生断裂，并用肉眼和低倍显微镜观察其断口表面，以此决定诸如成分、晶粒大小、硬化层深度或断点的一些因素。

fracture toughness(断裂韧度) 作为衡量裂纹延伸阻力的一般性术语。它有时仅限于断裂力学试验的结果，并直接将其用于断裂控制。然而，这个词所包含的结果是基于以带刻槽或预制裂纹为试件所作的简单试验，而不是依据断裂力学的分析。根据实际应用的经验或断裂力学试验的经验相关性，作为后一种类型试验的结果对于断裂的控制通常都是很有用的。也见 *stress-intensity fator(应力强度因数)*。

fragmentation(晶粒细化) 一种晶粒的再细化过程，由冷变形加工引起的横切滑移，并伴有带网格的重度变形，从而导致晶粒被进一步划分为细小和稀疏的微晶粒。这些小晶体或微晶粒有着不同的方位，并具有朝向由滑移系统决定的稳态方位旋转的倾向。

freckling(黑斑化) 一种偏析，就像自耗电极真空电弧重熔合金的宏观腐蚀试件上所显示的黑色斑点。

free bend(自由弯曲) 作用于试件两端的力所形成的弯曲，在其最大弯曲点不施加力。

free carbon(游离碳) 钢或铸铁中含有的碳的一部分以石墨或回火碳的元素形式存在。与 *combined carbon(复合碳)*相反。

free ferrite(游离铁素体) (1)在冷却的过程中，直接从亚共析奥氏体的分解里生成的铁素体，并没有同时生成渗碳体。(2)铁素体演变为单独的晶粒，而不像珠光体那样与碳化物紧密地结合在一起。故也称为*(先共析铁素体)* proeutectoid ferrite。

free machining(高速切削) 指与合金切削相关的特征，在这种合金里添加了一种或多种的组分，使之在切削时具有断成小切屑、低动力消耗、更低表面粗糙度以及更长刀具寿命的特点，这类元素添加的实例有：钢中加入硫或铅、黄铜中加入铅、铝中加入铅和铋、不锈钢中加入硫或硒。

freezing point(凝固点) 见优先选用术语 *liquidus(液相线)*和 *solidus(固相线)*。也见 *melting point(熔点)*。

freezing range(凝固范围) 在液相线温度与固相线温度之间的温度范围，此时熔化态与固态同时存在。

fretting(微动磨损) 由于处于紧配合的表面间经受特别小幅度的周期性相对运动，而产生的一种磨损形式。通常伴随微动磨损而发生腐蚀，尤其会产生非常细的磨损碎屑。也参见 *fretting corrosion(微动腐蚀)*和 *false brinelling(摩擦腐蚀)*(在滚动轴承中)。

fretting corrosion(微动腐蚀) (1)由于腐蚀和两个表面间的轻微震荡运动，而导致在接触表面的界面上的加速劣化。(2)一种有明显化学反应的微动磨损。微动腐蚀是以颗粒的脱落为其特征的，再形成氧化物，然后氧化物又作为研磨剂进一步加速磨损。微动腐蚀还会产生其他非研磨剂的化学反应生成物。

fretting fatigue(微动疲劳) 在发生微动磨损的表面上产生的疲劳断裂。这种微动将导致固体表面的逐步损坏。注意：如果生成磨损碎屑的颗粒，就要称之为微动磨损。

fretting wear(微动磨损) 由微动而引起的磨损。

friction(摩擦) 两个物体在外力的作用下，一个物体相对另一个物体运动或有运动的倾向时，在两者的共同界面上产生的切向阻力。

friction coefficient(摩擦因数) 见 coefficient of friction(摩擦因数)。

friction welding(摩擦焊接,FRW) 一种固态焊接工艺，在压力下接触的工件通过相互间的相对转动或移动产生热，以此使结合表面的材料发生塑性移位。

fuel gases(燃料气) 通常与氧气一起用于加热的气体，如乙炔、天然气、氢气、丙烷、稳定的甲基乙炔和丙二烯混合以及其他合成燃料和碳氢化合物。

full annealing(完全退火) 这是表示能达到最低强度和硬度的退火规范的不太准确术语。为使用术语具有实际意义，必须说明材料的成分和初始状态，以及时间-温度规范。

full center(半圆波度) 金属薄板或带材中心线以下的轻微波度。

fuller(fullering impression)(半圆型锤(敛缝型)) 主要用于锤锻中减小横截面和延长锻件毛坯的模具部分。半圆型锤常与 *edger(edging impression)(锻造模腔)*结合在一起使用。

full hard(全硬) 大约相当于冷变形加工状态的非铁和某些铁合金的回火，当材料超过此种状态，就无法再弯曲成形了。在技术规范中，全硬回火是根据相当于在完全退火之后按规定百分比进行冷压缩得到的最低硬度或抗拉强度(或是硬度或强度的范围)而定义的。对于铝，全硬回火相当于 *dead soft(极软化)*后 75% 的压缩量；对于奥氏体不锈钢，则为 50%~55% 的压缩量。

full mold(实型,消失模) 消耗型模型铸造工艺的商业名称，当熔化金属倒入铸模里时，聚苯乙烯的模型被蒸发掉。也见 *lost foam casting(失泡铸造)*。

furnace brazing(炉热硬钎焊) 硬钎焊的大批量生产工艺，将焊料金属预置于焊接接头处，然后将整个装置放进炉内加热至硬钎焊温度。

fused spray deposit(熔化喷涂沉积) 一种自熔喷洒沉积，先用传统的热喷涂方法进行沉积，再用加热气炬或炉子予以熔化。

fused zone(熔区) 见优先选用术语 *fusion zone(熔区)*、*nugget(熔核)*和 *weld interface(焊接界面)*。

fusible alloy(可熔性合金) 一族含有铋、铅、镉和铟的一、二、三、四和五元合金。该术语指的是 100 多种在较低温度熔化的合金中的任意一种，即其熔点都低于锡-铅软钎焊料的熔点(183℃ 或 360℉)。这种合金的熔点范围可以低至 47℃(116℉)。

fusion(熔化) 将钎料与基体金属(衬底)或仅是基体金属在一起熔化，最后连接在一起。也见 *depth of fusion(熔入深度)*。

fusion zone(熔区) 在基体金属上确定要作为焊缝横截面熔化的区域。

G

gage (1)(**尺度规格**)。薄板的厚度或线材的直径。不同的标准可根据其需要制定，而且对于铁的、非铁的产品和薄板、线材都各不相同。(2)(**量具**)。一种辅具，借助它检验人员能以肉眼更可靠地检查成形零件的大小和形状是否满足要求。(3)(**量规、检具**)。用于检验厚度或长度的仪器。

gage length(标样长度、计量长度) 样件上某一部位的原始长度，通过它测量应变、长度变化和其他特征。

gall(拉伤) 粉末冶金压块或模具零件的表面受到的损伤，是由于粘着在模具凹腔壁或冲头表面上的粉末所造成的。

galling(擦伤) (1)由于凸出点之间的过度摩擦而造成局部焊合，并随后发生 *spalling(剥落)*和造成所配合的一个零件或两个零件的表面进一步粗糙。(2)一种称为胶合的严重磨损形式，由此导致表面整体破坏或失效。擦伤在摩擦学的许多场合中得到使用，因此每次见到它，必须从其使用的上下文里确定其含义。也见 *scoring(划伤)*和 *scuffing(胶合)*。

galvanic cell(原电池) (1)一种以化学变化作为其电能之源的电池。通常由两个互相接触的不相似导体和一种电解质组成，或者由两个互相接触的相似导体和不相似电解质组成。(2)一种能发生自发的氧化-还原反应的电池或系统，以此在外接部分的电路里传导电子流。

galvanic corrosion(电腐蚀) 一种与原电池电流有关的腐蚀，其电池是由两个不相似的导体在一种电解质中或者两个相似的导体在不相似的电解质中构成的。其中两种不相似的金属相接触所发生的反应，也就是所谓的耦合反应。

galvanic couple(电耦合) 处于电接触的一对不相似导体，一般为金属。也见 *galvanic corrosion(电腐蚀)*。

galvanic current(动电电流,电偶电流) 在处于电耦合的金属或导电非金属之间流动的电流。

galvanic series(电势序) 在一定的介质中，按照其相对的腐蚀电位而排列的一组金属或合金。与 *electromotive force series(电动势序)* 相比。

galvanize(镀锌) 利用任何不同的工艺在金属表面镀锌。

galvanneal(镀锌层扩散处理) 热浸镀锌后使镀层保持熔融状态，直至与基体金属完全生成锌合金，以此在铁或钢表面形成锌-铁合金镀层。

gamma iron(γ-铁) 面心立方形的纯铁，稳定于温度910~1400℃(1670~2550℉)。

gamma ray(γ-射线) 一种短波长的电磁辐射，类似于X-射线，但源自于原子核，其波长为大约10^{-14}~10^{-10}m。也见 *electromagnetic radiation(电磁辐射)*。

gamma structure(γ-组织) 具有21价电子与13原子之比的组织类似相或电子复合物。一般这是一种大的复合型立方组织结构。

gang milling(排铣) 铣削方式，即将多把铣刀安装于同一主轴上进行切削，或将工件一次装夹，以相似的位置进行同时或顺序的切削。

gang slitter(多圆盘剪切机) 多对旋转圆盘剪切刀以一定的间隔分装在两根平行轴上，用于将金属薄板沿纵向剪切成带材或对薄板进行修边。

gangue(矿渣、脉石) 矿石在开始熔化之前，从其所需要的部分里分离出来的无用废脉石部分。

gap-frame press(马鞍形压床、开式单臂压力机) 一种普通型的压力机，其压力机的导架或机座设计成"C"形，这样模具空间的三个边就不受限制了。

gas atomization(气体雾化) 一种雾化工艺，使熔化了的金属被急速喷射的惰性气体流粉碎成颗粒。

gas classification(气流分级法) 利用流速可控的气流逆向吹向靠重力下落的颗粒，从而使粉末按其颗粒大小所占比例进行分离。这种方法可用于亚目级大小的颗粒分类。

gaseous corrosion(气蚀) 在金属表面，只有气体作为其惟一的腐蚀剂而不存在任何液相而造成的腐蚀。也称为干腐蚀。也见 *hot corrosion(热蚀)*、*oxidation(氧化)* 和 *sulfidation(硫化作用)*。

gas holes(气孔) 铸件或焊缝里的空隙，这是在金属凝固的过程中，气体从熔化的金属中逸出而形成的。这些气孔可以单个或成团地形成，也可能遍布整个凝固的金属内。

gas metal arc cutting(气体金属电弧切割) 一种电弧切割工艺，利用在连续金属(自耗)电极与工件之间的电弧加热使金属熔化，从而实现金属的切割。完全用外供气体或混合气体进行保护。

gas metal arc welding(气体保护金属极电弧焊，GMAW) 一种电弧焊工艺，利用在连续钎料和工件之间的电弧加热金属，并使其连接在一起。完全用外供气体进行保护。

gas pocket(气穴) 由被截留的气体所造成的空穴。

gas porosity(气孔疏松) 金属内部细小的空洞或孔隙，是由于在凝固过程中被截留的气体或被析出的溶解气体所造成的。

gas shielded arc welding(气体保护弧焊) 描述气体保护金属极电弧焊、气体保护钨极电弧焊和熔心电弧焊(当使用气体保护时)的一般性术语。

gassing(放气) (1)气体在金属上的吸附。(2)在金属熔化或凝固过程中，气体从中析出。(3)在电解过程中，气体从电极析出。

gas torch(气炬) 见优先选用术语 *cutting torch(割炬)* 和 *welding torch(焊炬)*。

gas tungsten arc cutting(气体保护钨极电弧割) 一种电弧切割工艺，利用在单钨(非消耗性的)电极与工件之间的电弧加热，使金属熔化从而实现金属的切割。用气体或混合气体进行保护。

gas tungsten arc welding(气体保护钨极电弧焊，GTAW) 一种电弧焊接工艺，利用在钨(非消耗性的)电极与工件之间的电弧加热金属，使其连接在一起。用气体或混合气体进行保护。焊接时是否采用压力或钎料可视情况而定。

gas welding(气体焊接) 见优先选用术语 *oxyfuel gas welding(氧燃气体焊接)*。

gate(浇口) 铸型中的部分流道，液态金属经由它进入型腔。有时作为一般术语指将金属引入型腔的整个连接通道网络。也见 *gating system(浇注系统)*。

gated pattern(带浇道的模型) 铸造所用的除了零件轮廓外还包括浇口的造型用模型。

gathering(镦粗) 锻造工序里使毛坯零件的横截面增大的工序。一般都是初始工序。

gathering stock(镦粗毛坯) 将锻件毛坯的一部分横截面增大到超过其原来尺寸的工序。

gating system(浇注系统) 铸型中由直浇口、流道和浇口构成的完整组成，金属流由此进入型腔，该术语也可用于指模型上的相应部分。

gear cutting(齿轮切削加工) 使用往复切削齿轮成形刀具或范成法齿轮刀具，沿工件的圆周、内表面或端面按照等间距加工齿形轮廓。

geared press(齿轮冲床) 一种冲床，它的主曲柄或偏心轴通过齿轮与其动力源相连接。

gear hobbing(滚齿加工) 使用一种外形类似蜗轮的

刀具进行齿轮切削，上面沿其螺旋有等间距的切削齿。在单头螺旋滚刀上，当滚刀转一周时，其刃齿也精确地前进一个齿距的距离。可以用同一把滚刀加工齿距一定，而在滚齿机加工范围内的任何齿数都不同的互换齿轮。

gear milling(齿轮铣削)　使用铣刀的齿轮切削加工，其铣刀的齿形与被加工齿轮的齿间形相一致。一次加工一个齿间形。

gear shaping(插齿)　通过插齿刀的往复运动切削齿面，同时与工件毛坯作啮合转动。

general corrosion(普通腐蚀)　(1)一种或多或少均匀地分布在整个表面的劣变形式。(2)腐蚀主要表现为一种均匀的减薄，其产生并非受到过明显的局部伤害。也见 *uniform corrosion(均匀腐蚀)*。

gibs(镶条)　导向条或导向板，用于保证金属压力机的一些零件，如滑块与机身之间有适当的平行度、垂直度以及滑动配合。它们一般可以通过调整，补偿由滑动产生的磨损，并以此维持其运行间隙。

glazing(砂轮钝化)　在磨削过程中，砂轮切削面上的磨粒被钝化。

glide(滑移)　(1)同 *slip(滑移)*。(2)一种非晶体图形的剪切运动，如一个晶粒越过另一个晶粒的滑动。

globular transfer(熔滴转移)　在消耗电极电弧焊中的一种典型金属转移，期间熔化钎料作为大液滴在电弧上跨越。与 *short-circuiting transfer(短路转移)* 和 *spray transfer(喷洒转移)* 相比。

gold filled(包金)　用一层金合金覆盖于一个或多个表面上，以此形成一层包覆或复合材料。包金牙修补就是这类材料的一个典型使用。

gooseneck(鹅颈)　在模型铸造中，连接金属熔炼炉膛或熔化室的出口与铸型的注入口或浇口的流道，它还包括一个将熔化金属压入铸模的路径。它也是 *hot chamber machine(热室压铸机)* 的金属注入机构。

gouging(气刨)　利用焊接技术将材料去除，形成斜坡或沟槽。也见 *arc gouging(电弧刨)* 和 *oxygen gouging(氧刨)*。

gouging abrasion(擦伤磨损)　属于高应力磨粒磨削中的一种，容易在其表面观察到沟槽或擦伤。也见 *abrasion(磨料磨削)*。

G-P zone(G-P 区)　一种 *Guinier-Preston zone(铝-铜合金时效组织区)*。

graded abrasive(分级磨料)　一种其单颗磨粒的大小限于一定范围内的磨料粉。也见 *grit size(磨料尺寸)*。

grain(晶粒)　多晶体材料中的单颗晶粒，它是否包含孪晶区和亚晶粒可视情况而定。

grain boundary(晶界)　在金属或陶瓷中，相当于从一个结晶体方向到另一个结晶体方向之间过渡的狭窄区域，以此对晶粒相互间进行分割，每一个晶粒里的原子都以一种顺序的式样排列。

grain-boundary corrosion(晶界腐蚀)　同 *intergranular corrosion(晶间腐蚀)*。也见 *interdendritic corrosion(枝晶间腐蚀)*。

grain-boundary sulfide precipitation(晶界硫化物沉淀)　过热金属的一种中间状态，通过过热温度下的部分溶解以及在随后的冷却过程中的再沉淀，使过热金属里的硫化物夹杂重新分布于奥氏体晶粒的边界上。

grain coarsening(晶粒粗大化)　一种使金属里产生过大的奥氏体晶粒的热处理。

grain flow(晶粒流线)　经抛光和腐蚀的锻件在截面上呈现出的纤维样流线，这是在锻造过程中，金属中的一些组分沿着加工方向所形成的走向。通过适当的模具设计所形成的晶粒流线能改善锻件所要求的力学性能。也见 *flow lines(流线)* 和 *forged structure(锻造组织)*。

grain growth(晶粒生长)　(1)多晶材料的晶粒平均尺寸的增大，通常是在较高的温度下加热所致。(2)当温度升高并十分接近其熔点时，在多晶材料中产生的一种现象，较大的晶粒还要长得更大，而最小的晶粒却逐渐缩小乃至消亡。也见 *recrystallization(重结晶)*。

grain refinemeng(晶粒细化)　通过对凝固过程的处置可以生成更多的晶粒(故而也更小)和/或形成特定的形状。细化一词常用于表达一种化学物质在金属里的添加，但是也能表示对冷却速率的控制。

grain refiner(晶粒细化剂)　一种加入熔化了的金属里的物质使得最终组织中形成比正常尺寸更小的晶粒。

grain size　(1)(**晶粒尺寸**)。在金属作为一种多晶材料中的晶粒面积或体积的度量。当晶粒个体大小相当均匀时，以其平均值表述。在包含两相或多相的金属里，晶粒尺寸指的是基体，除非有特别的规定。晶粒尺寸可以用单位面积或体积里的晶粒数、平均直径表达，或者表示为按面积测量推断的晶粒尺寸号数。(2)(**粒度**)。对于砂轮，见优先选用术语 *grit size(磨粒尺寸)*。

grain size distribution(晶粒尺寸分布)　在多晶固体

中晶粒或晶体的特征性尺度(通常为直径)的度量,或者按照从最小到最大的尺寸递增的数量分布。一般用显微镜进行测定。

granular fracture(粒状断口) 由金属断裂所形成的一种不规则表面,其特征为粗糙、粒状形貌,而不是平滑或纤维状的。它又可细分为穿晶断裂和沿晶界断裂。这种类型的断裂常称之为晶体断裂,然而不能由此推断金属是因为其"结晶"而发生断裂,因为所有的金属都是固态的结晶。也见*fibrous fracture(纤维状断裂)*和*silky fracture(丝光断裂)*。

granulated metal(粒化金属) 通过将液态金属倒入筛子或滴入一个旋转的圆盘而产生的细小颗粒,这两种情况都要用水冷却。

graphitic carbon(石墨碳) 钢或铸铁中的游离碳。

graphitic corrosion(石墨腐蚀) 灰铁腐蚀,其铁基体有选择性地被滤除,其后留下疏松的石墨基体。它发生于相对较淡的水溶液中以及埋在土里的管子和接头上。

graphitic steel(石墨钢) 部分碳以石墨形式存在的合金钢。

graphitization(石墨化) 石墨在铁或钢中的形成。在凝固过程中,形成石墨的现象为初始石墨化;而以后在热处理中形成的石墨,则为二次石墨化。

graphitizing(石墨化) 一种铁合金经过退火后,其部分或全部碳沉淀为石墨。

gravity hammer(重力锤) 一种锻锤,其锻造能量是通过锤头的自由落体的质量和速度获得的,并且为上模所携。例如板落锤和空气提升锤。

gravity segregation(重力偏析) 由于在凝固以前铸件或钢锭中重组分的沉降或轻组分的上升,因而造成的材料里的成分变化。

gray cast iron(灰铸铁) 见*gray iron(灰铁)*。

gray iron(灰铁) 由于存在片状石墨的以其灰色断口表面为特征的铸铁。

green compact(生坯) 未经烧结的粉末冶金或陶瓷的压实坯块。

green density(压坯密度) *green compact(生坯)*的密度。

green rot(绿蚀) 不锈钢、镍-铬合金以及镍-铬-铁合金在同时遭受氧化和渗碳作用时的一种高温侵蚀的形式。发生的侵蚀基本上先使铬以碳化铬沉淀,然后再使碳化物颗粒氧化。

green sand(生砂、湿砂) 一种经天然粘结的砂或复合型砂混合物,这种砂用水进行调和,并且在使用时仍保持湿润。

green sand core(生砂芯) (1)用生砂制成的型芯,并经捣紧后就用。(2)不需烘烤便可使用的砂芯。

green sand mold(生砂型) 用湿的配制型砂所造成的铸造砂型。与*dry sand mold(干砂型)*相反。

green strength(生坯强度) (1)经回火的型砂混合物在室温下的强度。(2)在烧结之前,生坯在搬运、储存的过程中保持其尺寸和形状的能力。(3)生坯的抗拉或抗压强度。

grindability(磨削性) 磨削的相对难易,类似于*machinability(切削性)*。

grindability index(磨削指数) 在规定磨削条件下,对材料磨削性的一种度量,用单位砂轮磨耗体积所磨去的材料体积表达。

grinding(磨削) 利用砂轮或砂带除去工件上的材料。

grinding burn(磨削烧伤) 见*burning(烧伤)*。

grinding cracks(磨削裂纹) 由于磨削过热或材料的高敏感度,而导致在较为硬质的材料表面上所形成的浅显裂纹。也见*grinding sensitivity(磨削敏感度)*。

grinding fluid(磨削液) 一种用于磨削加工的油基或水基的流体,其作用为:①减少或带走磨削时产生的热量;②磨屑形成时的润滑;③将磨屑或铁末从砂轮或砂带上冲洗掉;④有助于磨削的化学作用和机床的维护。

grinding oil(磨削油) 油型的磨削流体,它可以包含添加剂,但添加剂不可为水。

grinding relief(磨削离隙) 位于工件表面边缘的沟槽或凹口,在磨削的时候让砂轮的棱角从缺口悬出。

grinding sensitivity(磨削敏感度) 材料对于表面损伤如磨削裂纹的敏感度,它会受如硬度、显微组织、氢含量及残余应力等因素的影响。

grinding stress(磨削应力) 在工件的表面层由磨削造成的残余应力。它可以为拉应力、压应力或两者兼而有之。

grinding wheel(砂轮) 一种将磨粒粘结在一起的圆形切削工具。也见*diamond wheels*(金刚石砂轮)。

grit(磨粒) 经粉碎并有不同目度大小的铁或合成研磨材料,在喷砂设备里用于清理铸件。作为用于砂带和砂轮的材料,参见优先选用术语*abrasive(磨料)*。

grit blasting(喷砂处理) 使用钢、可锻铸铁或硬非金属材料的微小不规则碎屑为磨料的喷砂。

grit size(磨粒尺寸) 砂轮里磨料颗粒的名义尺寸,

相当于颗粒能够通过的筛子每一英寸长度上的开口数量。

Grossmann number(H)(格洛斯曼指数) 表述与静水相对比的淬火介质从热的钢工件上吸收热量能力的一个比值。用下面的公式表示：

$$H = \frac{h}{2k}$$

式中，h 为热传递系数，k 为金属的热导率。

gross porosity(总孔隙度、疏松性) 在焊接金属或铸件中的孔隙、气孔或球形空穴，它们在大小和数量上都远超过良好操作所达到的程度。

groundbed(接地基座) 埋入地下的物件，如废钢或石墨棒，将其作为阳极对诸如管线或其他地下构件起到阴极保护的作用。

ground connection(接地) 在电弧焊中，用于将工件引线(接地电缆)搭接在工件上的装置。

growth(cast iron)(铸铁的增长) 铸铁在高于480℃(900℉)的温度下反复加热或延长加热，而引起的铸件尺寸上的永久性增大，这是由于碳化物的石墨化或氧化作用所致。

Guerin process(格林工艺) 一种橡胶垫的金属薄板成形工艺，其主要部件为橡胶垫和成形压头或冲头。

guided bend(导向弯曲) 利用一个凸模将试件压进模具里进行弯曲，以此使试件的内外表面产生所要求的轮廓形状。

guided bend test(导向弯曲试验) 一种利用凸模(顶杆)和底板将试件弯曲成一定形状的试验。

guide mill(导向轧机) 一种小型手动轧机，一台机组有若干个机座，并有导轨将工件从入口送进轧辊。

Guinier-Preston (G-P) zone[铝-铜合金时效组织(G-P)区]。小的过饱和金属固溶体沉淀区域。G-P区本身并没有清晰又独特的晶体结构，但其含有特别高的溶质原子浓度。G-P区的形成构成了第一阶段的沉淀，通常还伴随着由它们所发生的固溶体的性质变化。

gun drill(深孔钻) 一种通常有一条或多条排屑槽和切削液通道通过其钻头体的钻头，用于深孔钻削。

gutter(排料槽) 沿着锻模型腔四周的飞边外缘的凹槽，用于容纳多余的金属，围绕整个型腔为多余金属所提供的空间，可保证锻件的完整性。也就是分型线外的一条浅槽。

H

habit plane(惯习面) 结晶相的平面或平面系，沿其平面会发生某些现象，如孪晶或相变。

Hadfield steel(海德菲尔德钢，一种高锰钢) 见 *austenitic manganese steel(奥氏体锰钢)*。

half cell(半电池) 将电极浸没在一种适当的电解质里，用于测量电极的电位。

half hard(二分之一回火硬度) 非铁合金或某些铁合金的一种回火，其特征为抗拉强度取在大约为全软和全硬回火的中点。

Hall process(霍尔工艺) 一种工业上应用的工艺，即利用溶于冰晶石的氧化铝熔化槽的电解还原，从氧化铝中提炼铝。

hammer(锻锤) 利用锤头落向铁砧对工件进行强力打击的一种机器。锤头可以靠重力或动力驱动。也见 *gravity hammer(重力锤)*。

hammer forging(锤锻) 通过对工件的反复打击进行锻造。

hammering(锻打) 通过压形或高速锤和相似铁砧将金属薄板加工成所要求的形状，以此产生所需要的凹面成形和减薄程度。

hammer welding(锻焊) 用锻锤进行锻造焊接。

hand brake(手动压弯机) 一种用于金属薄板折弯的小型手动折弯机器。其设计和用途都类似于 *press brake(弯边机)*。

hand forge(smith forge)(手工锻打) 一般用平模进行成形的锻造工艺。工件只能按要求粗略成形，很少或没有横向的制约，还包括有芯冲的工序。手工锻打一词指的是工序操作，而手工锻件则是指其锻打而成的零件。

handling breaks(搬运破损) 在加工过程中，由于不小心的搬运金属薄板所造成的不规则破损。这些破损是因为薄板在搬运中被折弯或垂弯造成的。

hard chromium(硬铬) 工程上所用的电镀铬(像增加金属滑动表面的耐磨性)，并不只是装饰性的镀层。通常要直接镀于衬底，厚度通常大于装饰性镀层(>1.2μm或0.05mil)，但不一定要更硬。

hard drawn(硬拉) 用于指称拉制品如线材、管材的一个不太精确用术语，它通常表示经冷挤压后无需后续退火。比较 *light drawn(轻度拉制)*。

hardenability(淬硬性) 铁合金经过临界温度以上的淬火而形成马氏体的相对能力。淬硬性一般用测量得到的淬火表面下具有一定的硬度(例如50HRC)的距离或马氏体在显微组织中所占的百分比予以表征。

hardener(母合金、中间合金) 富含一种或多种合金化元素的合金，将其加入熔融的金属中，有可能比

添加一些纯金属或不易熔合入基体金属的耐熔元素更能精确地控制其成分。有时也叫母合金(master alloy)或富合金(rich alloy)。

hardening(硬化) 通过适当的处理增加金属的硬度，通常包括加热再冷却。实际应用中，应当使用下列更为特定的术语：*age hardening(时效硬化)*、*case hardening(表面硬化)*、*flame hardening(火焰淬火)*、*induction hardening(感应淬火)*、*precipitation hardening(析出硬化)*和*quench hardening(淬火硬化)*。

hardfacing(表面硬化、表面耐磨堆焊) 利用焊接、喷涂或同类焊接工艺将硬的、耐磨的材料敷于零件表面，以此减少因磨料磨损、冲击、侵蚀、拉伤和气蚀而造成的磨损或材料损耗。也见*surfacing(堆焊)*。

hardfacing alloy(表面硬化合金) 可以作为耐磨材料应用于裸焊条、熔剂涂料焊条、长实心焊丝、长空心焊丝或通过表面硬化而沉积的粉末。

hard metal(硬金属) 汇集性术语，定义为具有高硬度、强度和耐磨性的烧结材料，其特征为具有韧性的金属粘合剂以及耐熔金属的碳化物、硼化物和氮化物的颗粒。该词作为广义使用，作为碳化物，在美国用得较多的词是*cemented carbide(硬质合金)*。而硼化物和氮化物则常归类于*cermet(s)(陶瓷合金)*。

hardness(硬度) 材料抗表面压痕或磨料磨损的能力，可以将其看成是能产生某种特定类型表面变形所要求应力的函数。硬度没有绝对刻度值，为了定量地表示硬度，每一种测试都有其特意定义的刻度。压痕硬度可以用布氏、洛氏、维氏、努氏和肖氏硬度的方法进行测试。

hard solder(硬质软钎焊料) 此术语错误地表示银基硬钎焊金属焊料。

hard surfacing(表面硬化处理) 见优先选用术语*surfacing(堆焊)*和*hardfacing(表面硬化、表面耐磨堆焊)*。

hard temper(硬回火) 同*full hard(全硬回火)*。

Haring cell(哈林电槽) 一种四电极电槽，用于在电解过程中测量电解电阻和电极极化。

H-band steel(H硬化能带钢) 具有规定淬透性极限值的碳、碳-硼或合金钢。其化学成分范围稍微有点不同于相应牌号的普通碳钢或合金钢。

heading(镦头) 将线材、圆棒和棒料放在模子里镦粗，通常使其一部分横截面积大于线材、圆棒和棒料的原始截面积。

hearth(炉膛) 某些炉子，如高炉、火焰炉及其他反射炉的底下部分，用于承载炉料，有时也可聚集和容纳液态金属。

heat(炉次) 经过冲天炉或加热炉的一次连续熔炼所得到的规定吨数的金属。或者指处置这些吨数所需要的熔化期。

heat-affected zone(热影响区，HAZ) 在硬钎焊、切割或焊接过程中，基体金属并未熔化的部分，但是其显微组织和力学性能因受热而有所改变。

heat check(热裂) 一种平行的表面裂缝形式，是由于最外表面金属的加热和冷却的快速交替而形成的，有时可以在锻模和冲孔的冲头上发现。有的是相互垂直的两组平行裂缝。

heat-resistant alloy(耐热合金) 适合于非常高温度用途的合金，它会有比较高的应力(因拉伸、热、振动或冲击引起)，并还常要求有耐氧化性。

heat sink(冷却剂) 一种能从关键元件或零件上吸收或传递热量的材料。

heat tinting(烘染、热蚀法) 金属表面通过加热氧化而着色，以此揭示其显微组织的细节。

heat treatable alloy(热处理合金) 可以通过热处理硬化的合金。

heat treating film(热处理膜) 一种很薄的涂层或膜，通常是在热处理的过程中生成于金属表面的氧化物。

heat treatment(热处理) 用一定方式加热和冷却固体金属或合金，以此获取所要求的状态和性能。按照这个定义，仅为了热变形加工所需要的加热则不包含在内。

heavy metal(重金属) 一种含有镍、铜和/或铁的烧结钨合金，$w(W)$至少为90%，并密度至少为16.8g/cm^3。

heel(基座) *base(基座)*的同义词。

heel block(垫板) 通常安装或垫在压力机或冲床的下模底下的金属块或板，以防止冲模或凸轮发生变形，或将变形降到最低限度。

hemming(折叠) 分两步将板料弯曲成180°，第一步弯成锐角，第二步用平头冲和模具将其并紧。

HERF(高能快速成形) 是*high-energy-rate forging(高能快速锻造)*或*high-energy-rate forming(高能快速成形)*的缩写。

herringbone pattern(人字形样式) 同*chevron pattern(波形断口样式)*。

high-conductivity copper(高导电率铜) 一种退火状态铜，用ASTM测试法测得最低100% IACS的导

电率。

high-cycle fatigue(高周疲劳) 指以较大的循环周数而发生的疲劳。是人为决定的但普遍能被接受的，在高、低周疲劳之间的界线考虑为10^4~10^5周。实际上，这种区分取决于在循环载荷的作用下产生的应变主分量是弹性(高周)还是塑性(低周)，而反过来它又取决于金属的性质和名义应力的大小。

high-energy-rate forging(高能快速锻造,HERF) 闭合模的热锻或冷锻工艺，为了使工件获得有效的变形，它利用储存于高压气体中的能量，使锤头加速到异乎寻常的高速。理想情况下只需一次打击便可以得到最终的轮廓形状，但大多数情况需要多次打击。在高能快速锻造中，依靠锤头的速度而不是质量，产生主锻造力。HERF也就是通常为大家所熟悉的高速锻造。

high-energy-rate forming(高能快速成形) 作为一类成形工艺，借助于能量的高速转移使产生高速应变的材料成形。也见 *explosive forming (爆炸成形)* 和 *electromagnetic forming (电磁成形)*。

high frequency resistance welding(高频电阻焊) 一类不同的电阻焊工艺，利用高频焊接电流将焊接热量集中在所要求的区域。

highlighting(擦亮) 针对复杂形状的选择性部位进行擦研或抛光，以此增加光泽或改变其颜色。

high residual phosphorus copper(高残余磷铜) 磷残留量一般为0.013%~0.04%(质量分数)的脱氧铜，这足以在很大程度上降低铜的导电性。

high-speed machining(高速切削) 高生产率的切削工艺，其切削速度超过600m/min(2000ft/min)，可达18000m/min(60000ft/min)。

high-strenth low-alloy (HSLA) steel(高强度低合金钢) 这种钢比一般的碳素钢具有更好的力学性能和更强的耐大气腐蚀性。但它们并不是正常意义上的合金钢，因为它们是按照规定的力学性能，而不是化学成分设定的(HSLA钢的屈服强度高于275MPa或40ksi)。特定HSLA钢的化学成分会随其不同的产品厚度而有所变化，以满足其对力学性能的要求。HSLA钢具有低的含碳量[w(C)0.05%~0.25%]，为了形成合适的成形性和焊接性，其w(Mn)可高达2.0%，还以不同的组合加入少量的铬、镍、钼、铜、氮、钒、铌、钛和锆。

high-temperature hydrogen attack(高温氢蚀) 在高温下，由于所吸附的氢与钢内部的碳化物发生反应，而造成脱碳和内部的裂变，致使材料丧失强度和塑性。

hindered contraction(收缩受阻) 由于形状的限制，金属铸件的某些区域无法按照热膨胀系数进行收缩。

HIP 见 *hot isostatic pressing (热等静压成形)*。

hob(滚齿刀) 一种刀齿沿着螺旋线排列的旋转切削刀具，用于范成加工齿轮的齿形或其他沿圆周有等间距形状的圆柱体工件。滚齿刀和工件相互以时间的相对关系旋转，而滚齿刀同时沿工件轴向或切向走刀，或径向朝工件作进给。滚齿刀不应与多头的螺旋铣刀、齿条铣刀以及类似的刀具相混淆，这些刀齿并不是沿螺旋线排列的。

hogging(毛坯荒加工) 利用棒材、中厚板或简单的锻件切削加工出零件，其初始毛坯中的许多材料都被切除掉。

holddown plate (pressure pad)(限位板,压力垫块) 在冲压工序中，用于支承工件并承受压力的板块。事实上，这块板也常起到脱模板的作用，因此也称为漏模板。

holding(保温) 在热处理的热周期中，工件温度保持不变的那一部分。

holding furnace(保温炉) 一种熔化金属在里面输送，并能保持适当温度直至浇铸的炉子。

holding temperature(保温) 金属热处理中工件保持不变的温度。

holding time(保温时间) 让热处理金属工件的温度保持不变的持续时间。

hole expansion test(孔扩张试验) 一种模拟试验，一块平薄板试件的中心有一个圆孔，将其夹在两个圆环形的模板之间，并用一冲头使其变形，孔经扩张最终沿其的边缘开裂。

hole flanging(孔口翻边) 在薄板零件已冲成的圆孔上，沿其圆周进行整体翻边成形。

holidays(涂层瑕疵) 镀层上的瑕疵(如密集气孔、裂纹或类似的缺陷)，造成基体暴露于与镀层表面相接触的腐蚀性介质中。

homogeneous carburizing(均质渗碳) 通过一种渗碳工艺，将低碳铁合金转变为在整个截面上都有较高的均匀含碳量。

homogenizing(均质化) 一种热处理工艺，将金属物体置于高温下，通过扩散消除或减少化学偏析。

honing(珩磨) 一种低速精加工工艺，主要用于形成均匀一致的高尺寸精度和低表面粗糙度，大多为内圆表面。珩磨过程时，利用粘结的油石或砂条以比一般磨削更轻的压力对加工表面同时进行旋转和往复运动，它只去除非常薄的一层材料。

Hooke's law(胡克定律) 适用于所有固体材料的一般性法则，表述为应力与应变成正比，即：

$$\frac{应力}{应变}=\frac{\sigma}{\varepsilon}=常数=E$$

式中，E 为弹性模量(杨氏模量)。应力和应变之间的常数关系仅适用于比例极限以下。也见 *modulas of elasticity(弹性模量)*。

Hoopes process(胡泊斯工艺) 一种电解炼铝的工艺，在还原槽里使用三层液体。

horn (1)(**电极臂**)。电阻焊焊机上的圆柱形电极臂或梁，用于传递电极压力和通常传导焊接电流。(2)(**超声波模具**)。一种锥形元件，将超声波能量从发生器传送到焊接或切削工具上。也见 *ultrasonic impact grinding(超声波冲击磨削)* 和 *ultrasonic welding(超声波焊接)*。

horn press(角台压力机) 一种金属成形压力机，上面安置了一根悬臂滑块或臂，它起到下模或对模具支承的作用，用于成形、冲孔、切断和铆接中空圆柱形及异型工件。

horn spacing(电阻焊臂间距) 电阻焊机中，相邻两个焊臂表面之间的距离。

hot box process(热芯盒造型工艺) 在翻砂造型中，以树脂基(呋喃树脂或酚醛树脂)为粘结剂的型砂造型工艺，类似于壳型制芯；用于制作的型芯是实心的，除非有心轴从中抽出。

hot chamber machine(热室压铸机) 压铸机中的一种，在压力作用下的金属熔化室浸入炉子里的熔融金属中。该热室有时也称为鹅颈，其机器有时就称为鹅颈机。

hot-cold working(热-冷变形加工) (1)一种高温形变热处理，其处理是在相变温度以上使金属变形，并以足够快的速度冷却，以便能保留部分或全部的形变组织。(2)一般为 *warm working(温变形加工)* 的同义词。

hot corrosion(热蚀) 一种金属表面的加速腐蚀，它是由于氧化和与硫化合物及其他杂质(如氯化物)发生反应的联合作用所造成的，并在金属表面形成促使正常保护性氧化物遭受熔化、破坏或断裂的熔融盐类。也见 *gaseous corrosion(气蚀)*。

hot crack(热裂) 一种在焊接件或铸件的凝固过程中逐渐扩张的裂纹。

hot-die forging(热模锻造) 一种热锻工艺，锻模与锻件毛坯两者都进行加热，一般的模具加热温度为110～225℃(200～400℉)，低于毛坯的温度。与 *isothermal forging(等温锻造)* 相比。

hot dip(热浸法) 将需要涂层的表面浸入涂层材料熔槽里的表面涂层。也见 *hot dip coating(热浸涂层)*。

hot dip coating(热浸涂层) 通过将基体浸入熔融金属里而获得的金属涂层。

hot extruction(热挤压) 一种用强力使经过加热的棒料流经模孔的工艺。进行挤压的温度取决于加工的材料。热挤压用于生产长、直且横截面不变的金属产品，如棒材、实心和空心的型材、管材、线材和带材，以及加工那些无法用冷挤压成形的材料。

hot forging(热锻) (1)一种对模具和/或锻坯进行加热的锻造工艺。也见 *hot-die forging(热模锻造)* 和 *isothermal forging(等温锻造)*。(2)在重结晶温度以上，经过压制和/或烧结的粉末冶金坯块，至少在两个方向上的塑性变形。

hot forming(热成形) 见 *hot working(热变形加工)*。

hot isostatic pressing(热等静压成形) (1)一种对坯块同时进行加热和成形的工艺，在其过程中，粉末包容在一个柔性的密封薄板金属或玻璃容器内，这种粉末在足够高的温度下可以在各个方向经受相等的压力，从而使其发生塑性变形和烧结。(2)一种让工件(如铸件、粉末锻件等)在高压釜里经受高温和等压气体压力处理的工艺，最为广泛使用的这种压力化气体为氩气。当铸件被进行热等压压制时，在热和压力的同时作用下，通过塑性变形、蠕变和扩散的共同作用，最终消除内部孔穴和微缩孔。

hot mill(热轧线,热轧线) 金属热轧生产线或装备。

hot press forging(热压锻) 在足够高的温度下，在压力机的模具之间对金属进行塑性变形，以防止发生应变硬化。

hot pressing(热压) 同时对粉末坯块进行加热和成形。也见 *pressure sintering(压力烧结)*。

hot pressure welding(热压焊接) 固态焊接工艺，通过加热和施加足够的压力使基体材料产生宏观变形，从而把材料连接在一起。可以使用真空或其他遮蔽介质。也见 *diffusion welding(扩散焊接)* 和 *forge welding(锻造焊接)*。与 *cold welding(冷焊)* 相比。

hot quenching(热淬火) 针对不同淬火工艺的一种不太准确的术语，其所用的淬火介质预设温度高于70℃(160℉)。

hot shortness(热脆性) 指一些合金在接近熔点的温度时受力或变形，会有沿晶界开裂的趋势。热脆性是由于合金中的低熔点组分造成的，通常只是微小的含量，偏析在晶界上。

hot tear(热裂) 由于在凝固时的 *hindered contraction*(收缩受阻)而造成的一种金属断裂。

hot top (1)(**热炉顶**)。一种能进行保温或加热的金属熔化槽，用于将熔化金属置于铸模的上方，以便浇铸钢锭或铸件并控制其固化，从而防止产生缩管和缩孔。(2)(**冒口**)。一些有耐熔材料包衬的铸钢或铸铁，将其插在铸模的端部并置于不同的高度，当钢锭凝固时用于给钢锭补缩。

hot trimming(热修边) 用修边冲床将热态零件(如锻件)的飞边或多余的金属切除。

hot upset forging(热镦锻) 一种形体变形工艺，用于将棒料、管子或其他均匀截面(一般为圆形)产品的一部分横截面予以增大和再度成形。其进行过程是，先用带槽的模具将经过加热的锻件毛坯夹住，再利用一种镦头装置对毛坯的端部施以轴向压力，这时通过金属的流动使其端部外涨(变粗)。也称之为镦头或热镦头。也见 *heading*(*镦头*)和 *upsetting*(*镦粗*)。

hot-worked structure(热变形加工组织) 经高于重结晶温度加工的材料组织。

hot working(热变形加工) (1)在同时发生重结晶与变形的温度和应变率条件下的金属塑性变形，以此防止发生任何应变硬化。也称之为热锻和热成形。(2)受控的机械制造工序使产品在高于重结晶的温度下成形。对照 *cold working*(*冷变形加工*)。

hubbing(压制阴模法) 用一个阳主冲头(即所谓的凸模)压入金属板块中，以此制成锻模的型腔。

Hull cell(赫尔槽) 一种特殊的电镀槽，作为试验工作，它可以测出一系列已知的电流密度。

hydraulic hammer(液压锤) 一种重力下落锻锤，两次行程之间靠液压将重锤举起。

hydraulic-mechanical presss brake(液-力压弯机) 一种机械压弯机，是利用安置在机械连杆上的液压缸驱动其锤头通过工作行程。

hydraulic press(液压机) 一种利用流体压力驱动和控制锤头的压力机。水压机可以用于开模和闭模的两种锻造。

hydrodynamic machining(流体动力切削) 利用高速流体对工件的冲击进行切削。也见 *water jet/abrasive water jet machining*(*水力喷射/磨料水力喷射切削*)。

hydrogen-assisted cracking(氢裂,HAC) 见 *hydrogen embrittlement*(*氢脆*)。

hydrogen-assisted stress-corrosion cracking(氢应力腐蚀致裂,HSCC) 见 *hydrogen embrittlement*(*氢脆*)。

hydrogen blistering(氢泡伤) 在金属表面或表面下形成的气孔，来源于内部的过压氢气。而氢气则是在清洗、电镀或腐蚀的过程中产生的。

hydrogen brazing(氢硬钎焊) 这个术语有时用于表示在含氢气氛中的硬钎焊，通常在炉子里进行；建议使用适当的工艺名称。

hydrogen damage(氢蚀) 一般性使用术语，是指某些金属由于氢的存在而引起的脆化、开裂、泡伤和生成氢化物。

hydrogen embrittlement(氢脆) 一种由于原子氢的存在而造成金属的韧性和塑性降低的过程。氢脆可以分为两种类型。第一种，即所谓的内部氢脆，因氢进入熔融金属而发生，并使其在金属凝固后立即成为过饱和。第二种，即环境氢脆，由于氢气被固体金属吸附所致。这发生在高温热处理，以及电镀、与维护化学物质相接触、腐蚀反应、阴极保护和运行于高压氢气等一些使用过程中。在缺少残余应力和外加载荷的情况下，环境氢脆有不同的表现形式，如泡伤、内裂纹、氢化物的生成和塑性降低。当拉应力或应力强度系数超过某一特定临界值时，原子氢与金属的相互作用会引起次裂纹的生长，从而导致断裂。在缺少腐蚀反应(阴极极化)的情况里，常用的术语为氢致开裂(HAC)或氢应力开裂(HSC)。在腐蚀性强的情况里，通常如锈斑或裂隙(阳极极化)，一般被称之为应力腐蚀开裂(SCC)，但应更确切地称其为氢致应力腐蚀开裂(HSCC)。因此，HSC和电化学阳极SCC能够单独或者联合发生HSCC。对于某些金属，如高强度钢，认为其机制全部或接近全部都是HSC。对于有HSC参与的机制，并非总能被认识到，往往都被作为SCC进行分析。

hydrogen-induced cracking(氢引发开裂,HIC) 同 *hydrogen embrittlement*(*氢脆*)。

hydrogen-induced delayed cracking(氢引发延迟开裂) 用于特指氢脆的一种形式，即金属在低于屈服应力的稳态应力状态下所自发出现的断裂。通常在应力作用(或遭应力作用的金属暴露在氢气里)与裂纹的发生之间有一段延迟时间。也称静态疲劳。

hydrogen loss(氢损) 在纯净的氢气气氛中，按照规定的程序加热金属粉末或坯块的代表性样品，以此测定造成的其重量上的损耗。从广义上讲，当将其应用于仅含有可用氢进行还原的氧化物，而不含有任何可生成氢化物元素的材料时，此方法也就可以进行样品氧含量的测定。

hydrogen overvoltage(氢过电压) 在电镀中与氢气

释出有关的过电压。

hydrogen stress cracking(氢应力开裂,HSC)　见 *hydrogen embrittlement (氢脆)*。

hydrometallurgy(湿法冶金)　金属利用水或水溶液的工业提炼或冶炼方法。

hydrostatic extrusion(静压挤制)　利用静压流体代替传统的挤压，用锤头使棒料由模孔中挤制而出的方法。

hydrostatic pressing(静水压)　一种特殊的静压压力加工，使用水或油的液体作为压力传递的介质，所以只限于在接近室温的情况下操作。

hydrostatic tension(均张力)　三个相等且相互垂直的拉应力。

hypereutectic alloy(过共晶合金)　在呈现共晶的合金系统的成分中，有一种合金元素含量超过其共晶成分含量的合金，并且在其实现平衡的显微组织中含有某种共晶组织。

hypereutectoid alloy(过共析合金)　在呈现共析的合金系统成分中，有一种合金元素含量超过其共析成分含量的合金，并且在其实现平衡的显微组织中含有某种共析组织。

hypoeutectic alloy(亚共晶合金)　在呈现共晶的合金系统的成分中，有一种基体金属含量超过其共晶成分含量的合金，并且在其实现平衡的显微组织中含有某种共晶组织。

hypoeutectoid alloy(亚共析合金)　在呈现共析的合金系统成分中，有一种基体金属含量超过其共析成分含量的合金，并且在其实现平衡的显微组织中含有某种共析组织。

hysteresis(magnetic)(磁性迟滞)　一种物质的磁化相对于任何作用于它的磁场周期性变化的滞后。

hysteresis(mechanical)(机械迟滞)　当材料承受重复性载荷时，在其任何一个加载和卸载的过程中，所发生的能量被永久性吸附或损耗的现象。

I

IACS(国际退火铜标准)　用于测试导电性的标准资料。用%IACS所表达的材料导电性等于1724.1除以材料电阻率(以nΩ·m为单位)。

ideal critical diameter(D_I)(理想临界直径)　在理想淬火条件下，淬火的一根棒料在其中心具有50%的马氏体时的直径，而且它的淬火表面以无限快的速度冷却[即 $H=\infty$，这里 H 为淬火严重度系数或 *Grossmann number (格洛斯曼指数)*]。

idiomorphic crystal(自形[整形]晶体)　不受制约地生长的单个晶体，故形成清晰的晶形平面。比较 *allotriomorphic crystal (异形晶体)*。

immersed-electrode furnace(浸极式炉)　一种用于零件液体渗碳的炉子，它利用浸没在液体中的电极将盐加热熔化的盐浴槽。也见 *submerged-electrode furnace (浸极式炉)*。

immersion cleaning(浸入式清洗)　将工件浸入溶液中进行清洗。

immersion coating(浸入式镀层)　通过在溶液中的化学或电化学作用，而不使用外接电流产生镀层。

immersion plating(浸入式电镀)　对浸没于溶液中的金属进行金属沉积镀层，而不需要外接辅助电流。也称浸渍电镀。

impact energy(冲击吸收功)　一种材料发生断裂所需要的能量，通常用J或lbf·ft表示，一般用V形缺口试验或夏比试验的方法进行测定。试件的类型和试验的条件会影响其数值，故应予以规定。

impact extrusion(冲击挤制)　用凸模冲击封闭在下模中的毛坯(通常不加热)的工艺(或由此而得的产品)。其金属的流动可以是在凸模与下模之间或通过另一出口。不加热毛坯的冲击挤压也常常称为冷挤压。

impact line(冲击线痕)　经深拉的金属薄板零件表面上的一种瑕疵，是由于金属厚度的轻微变化所造成的。因凸模对毛坯的冲击而造成的这种痕迹叫做冲击线；在成形过程中毛坯由下模向凸模转移，或通过拉环对被急剧拉伸毛坯的反作用力而造成的痕迹则称为反冲线痕。

impact load(冲击载荷)　一种特别严重的冲击载荷，例如由瞬间挡住下落重块、两个机体间的撞击(如机械式锻锤)以及爆炸冲击所造成的载荷，这时能特别快地形成应力。

impact strength(冲击强度)　固体的一种回弹性或韧性的度量。所能经受一次打击而不发生断裂的最大力量或能量(按照一种固定的步骤)，与之相反的是在稳定作用力下的断裂强度。

impact test(冲击试验)　与静态试验不同，测定使试件发生高速断裂时所吸收的能量的一种试验。试验可按照拉伸、弯曲或扭转的方式进行，而且其试棒是否开缺口可视情况而定。也见 *Charpy test (夏比试验)*、*impact energy (冲击吸收功)* 和 *Izod test (悬臂梁冲击试验)*。

impact wear(冲击磨损)　一个固体表面由于与另一个固体发生反复碰撞而造成的磨损。作为一种多重碰撞的情况和当相对于被碰表面的一个或多个碰撞

体都是非常小时，多用术语 *erosion*（*冲蚀*）。

impingement（连续冲击） 一种液体或固体颗粒与固体表面之间连续不断的碰撞过程。

impingement attack（浸蚀） 与液体的湍流有关的腐蚀。而且由于卷入的气泡而得到加速。也见 *erosion-corrosion*（*冲蚀-腐蚀*）和 *impingement corrosion*（*冲击腐蚀*）。

impingement corrosion（冲击腐蚀） 一般与局部高速流体撞击固体表面有关的 *erosion-corrosion*（*冲蚀-腐蚀*）中的一种形式。

impingement erosion（冲击冲蚀） 由于液体撞击固体表面发生的材料损耗。也见 *erosion*（*冲蚀*）。

impregnation（浸渗） （1）疏松铸件的处理，用密封介质阻止其压力泄漏。（2）填充烧结坯块的方法，通常用液体，如润滑剂。（3）将非金属物质颗粒混入经烧结的碳化物基体，如金刚石渍刀具里的方法。

impression-die forging（模锻） 利用特制的模具型腔对工件进行三维控制，使其按要求的大小、形状成形的锻造。

impurities（杂质） （1）材料中存在的一些不需要的元素或化合物。（2）在化学物质或材料中存在的本不应包含的（一些）微量组分或成分，而且达到或超过了某一不应有的程度。

inclinable press（可倾式冲床） 一种可以倾斜的冲床，以适应成形零件的操作需要。也见 *open-back inclinable press*（*后开式可倾冲床*）。

inclusion（夹杂物） （1）在材料或零件中出现的一种物理或机械瑕疵，通常由固体的并被封闭在里面的外来材料所组成。夹杂物常能传递一些结构性应力和能量场，但是与其母体材料有明显程度的差异。（2）存在于金属母体里的外来材料的颗粒。这些颗粒通常是一种化合物，如氧化物、硫化物或硅酸盐，但也可以是从外界进入母体的任何物质（基本上是不可溶的）。也见 *exogenous inclusion*（*外来夹杂物*）、*indigenous inclusion*（*固有夹杂物*）和 stringer（*纤维状夹杂物*）。

inclusion count（夹杂物定量分析） 测定金属中非金属夹杂物的数量、种类、大小和分布。

incomplete fusion（不完全熔化） 焊接中的熔化不够完全。

indentation hardness（压痕硬度） （1）材料抗压痕能力。这是常用的硬度测试方式，一种尖或圆的压头在相当稳态的载荷作用下压入表面。（2）固体表面在预定的条件下，抵御一种较硬的次级物体对其压陷的能力。用于表达其压痕硬度的数值并不是绝对物理量，它取决于用于表示硬度的硬度刻度。也见 *Brinell hardness test*（*布氏硬度试验*）、*Knoop hardness test*（*努氏硬度试验*）、*nanohardness test*（*纳米硬度试验*）、*Rockwell hardness test*（*洛氏硬度试验*）和 *Vickers hardness test*（*维氏硬度试验*）。

indenter（压头） 在硬度试验里使用的规定几何形状的物体，通常选用具有很高硬度的，用于测定固体表面抵御压陷的能力。

indigenous inclusion（固有夹杂物） 一种在熔化金属处理过程中所原生的固有（或内在）的夹杂物。这种固有夹杂物包括硫化物、氮化物和氧化物，都是因熔化金属在局部介质中的化学反应而生成的。这些夹杂物都是很小的，需要用显微镜放大进行鉴别。与 *exogenous inclusion*（*外来夹杂物*）相比。

indirect-arc furnace（间接电弧炉） 一种电弧炉，其金属炉料不作为电弧的一极。

indirect（backward）extrusion（间接挤压加工） 见 *extrusion*（挤压加工）。

induction brazing（感应硬钎焊） 一种硬钎焊工艺，其需要的热量是从感应电流通过工件电阻所获得的。

induction furnace（感应电炉） 一种交变电流的电炉，其一次导线绕组通过电磁感应产生二次电流，由它在金属炉料中发生热量。

induction hardening（感应淬火） 一种表面淬火工艺，利用电磁感应仅对适当的铁质工件的表层加热，且当其达到临界温度以上时，立即进行淬火。

induction heating（感应加热） 由电阻和磁滞损耗的联合作用形成的加热，其中磁滞损耗是由于金属遭受到磁场变化而感应生成的，而交变磁场则由通有交变电流的线圈产生，并围绕在线圈的周围。

induction melting（感应熔化） 在感应炉里的熔化。

induction soldering（感应软钎焊） 一种软钎焊工艺，所需要的热量是由感应电流通过工件电阻产生的。

induction tempering（感应回火） 通过低频电流的感应加热进行的钢的回火。

induction welding（感应焊接） 一种焊接工艺，借助于高频感应焊接电流通过工件电阻所产生的热量实现金属间的连接，其间是否施加压力可视情况而定。高频焊接电流的作用是将焊接热量集中于所要求的部位。

induction work coil（感应工作线圈） 用于感应加热和熔化，以及感应焊接、硬钎焊和软钎焊的感应头。

inducter(感应头) 由一个或多个相互关联的绕组线圈组成的装置，用以在电路中产生电感。它是否有铁磁心可视情况而定。

industrial atmosphere(工业气氛) 工业生产重地的一种气氛，以油烟、飘尘和硫的化合物为其主要成分。

inert anode(惰性阳极) 电解液里，在以电解作用为主的条件下不会发生溶解的阳极。

inert gas(惰性气体) (1)气体，诸如氦、氩或氮都是很稳定的，它们不助燃，也不会与其他材料产生反应物。(2)在焊接过程中，正常情况下不会与基体金属或焊料金属发生化学结合的气体，也见 *protective atmosphere (保护气氛)*。

infiltration(渗渍) 将低熔点的金属或合金渗透进疏松的经烧结或未经烧结的坯块里的一种工艺。

infrared brazing(红外线硬钎焊) 利用红外线辐射所提供的热量进行硬钎焊的工艺。

infrared soldering(红外线软钎焊) 利用红外线辐射所提供的热量进行软钎焊的工艺。

infrared spectroscopy(红外光谱) 对于材料系统与位于红外光谱区的电磁辐射之间相互作用的研究。这种技术对于确定有机或无机化合物的分子结构是很有用的，它是通过鉴定与不同分子有关的旋转和振动能级进行这种分析的。也见 *electromagnetic radiation (电磁辐射)*。

ingate(内浇口) 同 *gate (浇口)*。

ingot(钢锭) 一种形状简单的铸件，适用于热变形加工或重新熔化。

ingot iron(铁锭) 商用的铸铁。

inhibitor(抑制剂,阻化剂) 一种能阻止某种特定化学反应(如腐蚀)的物质。酸洗抑制剂能阻止金属的溶解，却不会妨碍从钢的表面除去锈皮。

inoculant(孕育剂) 一种加入熔化的金属里后能改善其组织的物质，以致在一定程度上改变其物理和力学性能，尚无法根据使用这种物质所引起的成分变化对其进行解释。铁-硅基合金就是用于灰铸铁和球墨铸铁的普通孕育剂。

inoculation(孕育作用) 在熔化金属中添加一种材料，以此形成晶体化的核心。也见 *inoculant (孕育剂)*。

insert (1)(金属模型)。用二次材料(通常为金属)制成的零件，它是置于铸型里的一个形似成品铸件整体结构的零件。(2)(金属型芯)。模具或铸型中可移动的部分。

insert die(嵌模) 含有锻件的部分或全部型腔的相对较小的模具，并固定于主模板上。

inserted-blade cutters(镶嵌式刀片的切削刀具) 可以重复安装刀片的刀具，该刀片可以是整体型或刀头型，通常还能调整。

instrumented impact test(带检测的冲击试验) 一种冲击试验，其作用于试件上的载荷在发生断裂之前，可以连续地记录成为时间和/或试件挠曲的函数。

intense quenching(强力淬火) 淬火介质使零件的冷却速度比蒸馏水至少快 2.5 倍以上的淬火。也见 *Grossmann number(H)(格洛斯曼指数)*。

intercept method(截交法) 一种定量的金相分析技术，将所要求的晶粒大小和夹杂物的数量表示成为：在金相图像中一条跨越被测特征颗粒的直线上，其单位长度所截到的这些颗粒图像次数。

interconnected porosity(互联孔隙) 在烧结物体中孔隙相连的网状组织，借此流体或气体得以透过该物体。也称之为互锁或开口孔隙。

intercritical annealing(临界温度间退火) 任何将温度升高至并保持在上、下临界温度之间的退火，同时以此获得部分奥氏体化，然后再缓慢冷却或保持在下临界温度之下的温度里。

intercrystalline(晶间) 多晶体材料的晶体或晶粒之间。

intercrystalline corrosion(晶间腐蚀) 见 *intergranular corrosion (晶间腐蚀)*。

intercrystalline cracking(晶界开裂) 见 *intergranular cracking (晶间开裂)*。

interdendritic corrosion(枝晶间腐蚀) 腐蚀主要沿枝晶间的线路延伸。这种侵蚀是因为成分上的局部差异，如在合金铸件中常见到的核化所造成的。

interdendritic porosity(枝晶间孔隙) 产生在铸件金属中枝晶间的孔穴。

interface(界面) 任意两相间的边界。在三相(气、液和固)之间存在着五种界面：气-液、气-固、液-液、液-固和固-固。

interfacial tension(界面张力) 两相间界面上的收缩力。

intergranular(晶粒间) 晶体或晶粒之间，也称 *intercrystalline (晶间)*。对照 *transgranular (穿晶)*。

intergranular corrosion(晶间腐蚀) 主要发生于晶粒边界上的腐蚀，通常对邻近的晶粒没有腐蚀或很少产生腐蚀。也见 *interdendritic corrosion (枝晶间腐蚀)*。

intergranular cracking(晶间开裂) 多晶聚合体中发

生在晶粒或晶体间的裂纹或断裂。也称 *intercrystalline cracking*（*晶界开裂*）。对照 *transgranular cracking*（*穿晶开裂*）。

intergranular fracture（**晶间断裂**） 多晶体材料的脆性断裂，其断裂发生于构成材料的晶体或晶粒之间。也称为晶间断裂。对照 *transgranular fracture*（*穿晶断裂*）。

intergranular penetration（**晶间熔透**） 焊接中，金属焊料沿基体金属的晶界熔化穿透。

intergranular stress-corrosion cracking（**晶间应力腐蚀开裂，IGSCC**） 沿晶界开裂的应力腐蚀裂纹开裂。

intermediate annealing（**中间退火**） 在制造过程和最终的处理之前，对可锻金属进行的一个阶段或多个阶段的退火。

intermediate electrode（**中间电极**） 同 *bipolar electrode*（双极电极）。

intermediate phase（**中间相**） 在一种合金或化学系统里的清晰可辨的组织相似的相，其成分范围并不扩张到系统的任何纯净的组分中。

intermetallic compound（**金属间化合物**） 合金系统中的一种中间相，它有较窄的均质性范围和相对简单的化学计量配比，并有范围为从金属到离子的不同类型原子键特性。

intermetallic phase（**金属间相**） 含有两种或两种以上金属的化合物或中间固溶体，其成分、特征性能和晶体组织一般都有别于纯组分的系统。

intermittent weld（**间断焊缝**） 一种重复中断焊接的焊缝。

internal friction（**内摩擦**） 材料由于受到脉动应力的作用，而使能量转变为热量。

internal grinding（**内圆磨**） 类似内圆柱面或孔的内表面磨削。

internal oxidation（**内部氧化**） 在金属表面下生成的一种与外隔绝的腐蚀物颗粒。这是由于氧、氮、硫等从表面向内部扩散，而导致某种合金组分的氧化作用所造成的结果。也称为次生氧化皮形成。

internal shrinkage（**内部缩孔**） 在铸造的凝固过程中，由于截面上不适当的补缩而形成的铸件内部的孔穴或孔穴网状组织。

internal stress（**内应力**） 见优先选用术语 *residual stress*（*残余应力*）。

interpass temperature（**层间温度**） 在多层焊接中，在下一层开始焊接前，已沉积焊接金属的温度（最低和最高按规定而定）。

interrupted aging（**间断时效**） 分步用两种或多种温度进行时效，其中每一步后都要冷却到室温。也见 *aging*（*时效*），并比较 *progressive aging*（*顺序时效*）和 *step aging*（*分步时效*）。

interrupted-current plating（**断续电流电镀**） 利用周期性的短间断电流的电镀，以此降低阳极的极化作用和提高临界电流密度。最常用于氰化铜电镀。

interrupted quenching（**断续淬火**） 一种淬火工艺规范，工件经过第一次大大高于淬火液的温度淬火后，再经受第二次与第一次不同的冷却速度的淬火。

interstitial solid solution（**间隙固溶体**） 一种有时形成于由两种原子大小差别较大的元素所组成的合金体系的固溶体。原子小的元素，如碳、氢和氮常会溶解进固体金属中形成这种固溶体。其空间晶格类似于纯金属，而碳、氢和氮原子占据了金属原子之间的空间或空隙。也见 *substitutional solid solution*（*替代固溶体*）。

intracrystalline（**沿晶体内部的**） 进入或穿越金属的晶体或晶粒内部，同穿晶体（transcrystalline）或穿晶（transgranular）。

intracrystalline cracking（**晶体内开裂**） 见 *transgranular cracking*（*穿晶开裂*）。

inverse chill（**反白口**） 铸件截面上的一种状态，其心部出现麻斑或白口，而其他截面还是灰铁。即所谓的反向白口、内心白口和倒白口。

inverse segregation（**反偏析**） 低熔组分在合金的某些先行凝固的地方聚集起来。

investing（**熔模造型**） 在熔模铸造中，将熔模砂浆倒入型箱里，使其围绕着模型形成铸模的过程。

investment（**熔模造型**） 将一种用按级筛选的耐熔材料、粘结剂和液料配制而成的可流动的混料或砂浆，围绕着模型倒入并按其形状成形，然后使之变硬成为熔模的浇铸模。

investment casting （1）（**熔模铸造**）。在室温下用耐熔砂浆涂围于一种消耗性模型的四周，或采用熔模造型；随后通过加热使石蜡或塑料模型熔化失去；然后将液体金属浇注进熔模里。也称为 *precision casting*（*精密铸造*）或 *lost wax process*（*失蜡铸造*）。（2）（**熔模铸件**）。用熔模工艺制造的零件。

investment compound（**熔模混料**） 熔模铸造中，用于制造熔模的按级筛选的耐熔材料、粘结剂和液料配制而成的混料。

investment precoat（**熔模预涂**） 将一种极细的熔模涂层像砂浆一样直接涂敷于模型表面，以此复制出

最高的表面光滑度。这个涂层外面再涂敷较粗的、便宜的和更有渗透性的熔模材料，以此制成铸模。也见 *dip coat*（*浸渍涂料*）和 *investiment casting*（*熔模铸造*）。

investment shell（熔模壳型） 通过将预制的模型浸入一种浸渍涂层砂浆中，取出后再用粗糙的陶瓷颗粒涂撒，如此交替进行，直至达到所要求的厚度便可制得陶瓷铸模。也见 *investment casting*（*熔模铸造*）。

ion（离子） 一个或一组原子由于失去或得到一个或多个电子而带上电荷。由一个氢原子或一个金属原子形成的离子通常带正电荷。由一个非金属原子或一组原子形成的离子则通常带负电荷。离子所携带的电子电荷数名为其离子价。电荷数用上标符号和数字表示，例如带有一个正电荷的钠离子表示为 Na^+；而带有二个负电荷的硫酸离子，则表示为 SO_4^{2-}。

ion carburizing（离子渗碳） 一种表面硬化的方法，通过在真空里使用高压电能使碳离子扩散进工件。与等离子渗碳（plasma carburizing）或辉光放电渗碳（glaw-discharge carburizing）同义。

ion exchange（离子交换） 离子在液体和固体之间的可逆性互换，并且不会引起固体结构上的明显变化。

ion implantation（离子注入） 将经离子化的颗粒束中的相关原子注入固体（作为屏极），从而使其近表层的理化性能得到改善的工艺。

ion nitriding（离子氮化） 一种表面硬化的方法，在真空中利用高压电能将氮离子扩散进工件。与等离子氮化（plasama nitriding）或辉光氮化（glow-discharge nitriding）同义。

ion plating（离子镀） 原子膜沉积工艺的一般性使用术语，基体表面和/或沉积膜经受高能颗粒（一般为气体离子）通量的作用，足以使其界面区域及膜的性能发生变化。

iron casting（铸铁件） 用铸铁制造的零件。

ironing（挤拉法） 一种通过减少壁厚和外径增加管形或杯形零件长度的工艺，零件内径保持不变。

iron rot（铁蚀） 指木材因为与铁基合金接触而发生的劣变。

iron soldering（烙铁焊） 用 *soldering iron*（*软钎焊烙铁*）获取所需热量的一种焊接工艺。

irradiation（辐照） 将材料或物体放在 X-射线、γ-射线、紫外线或其他离子化辐射中照射。

isocorrosion diagram（等蚀图） 一种改变溶液（介质）的成分和温度，而使其腐蚀性表现为不变的图形或曲线。

isomorphous（同晶形） 具有相同的晶体结构。这通常指构成一种连续系列固溶体的中间相。

isostatic pressing（等静压成形） 一种制造粉末冶金坯块的工艺，将粉末置于柔性密封的模具里，故能从所有方向同等施压使之成形。也见 *cold isostatic pressing*（*冷等静压成形*）和 *hot isostatic pressing*（*热等静压成形*）。

isothermal annealing（等温退火） 先使铁合金奥氏体化，再冷却到能使其变成较软的碳化铁聚集物的奥氏体相变温度，并就此保温。也见 *austenitizing*（*奥氏体化*）。

isothermal forging（等温锻造） 一种热锻工艺，将模具加热到与工件相同的温度，并在锻造的过程中保持恒定和均匀的温度。比较 *hot-die forging*（*热模锻造*）。

isothermal transformation（等温转变） 发生在恒温下的一种相变。完成这种转变所需的时间以及在某些情况里在转变开始以前所延续的时间，它取决于为实现同样的转变所需的低于平衡温度的过冷（或高于平衡温度的过热）温度程度。

isothermal transformation（IT）diagram（等温转变图） 表示奥氏体开始转变和结束转变所需要的等温时间相对于温度的函数曲线。同时间-温度-转变图（TTT）或 S-曲线。

isotropic（各向同性） 在所有各方向具有一致的性能。一种各向同性的材料所测得的性质与测试的轴线无关。

isotropy（各向同性度） 在所有各方向具有相同性能值的条件。

Izod test（悬臂梁冲击试验） 一种冲击试验，将试验用的 V 形缺口试件垂直安装，利用一个摆臂端部的重锤对其进行突然的撞击，造成其自由端断裂所消耗的能量作为材料的冲击强度或冲击韧度的测量值。与 *Charpy test*（*夏比试验*）相比。

J

jaw crusher（鳄式破碎机） 一种将金属块、矿石或团状烧结块初步地破碎成为粗糙颗粒的机器。

jig（夹具） 在切削或装配过程中，夹持零件或为刀具导向的机构。

jig boring（坐标镗削） 工件安装在工作台上用单点刀具进行的镗削，而工作台可以通过移位让工件上任何需要切削的部分接受刀具的加工。因此孔距可

以精确定位。这种镗削加工可以在铣床或坐标镗床上进行。

J-integral(J-积分) 一种数学表达式；包络从一个裂纹面到另一个裂纹面前沿的线或表面的积分，用于表示在发生断裂之前，具有适当塑性的材料的断裂韧度特征。J-积分不需要再通过分析围绕裂纹前沿的局部应力-应变场来描述材料裂纹尖端附近的性状；J_{IC}是预先存在的裂缝开始扩展所要求的J-积分临界值。

joint(接头) 两个或多个元件以机械紧固、焊接、硬钎焊、软钎焊或粘结的方式连接在一起的结合部位。

joint clearance(接头间隙) 接头结合表面之间的距离。在硬钎焊中指的是在焊接以前，处于焊接温度下所存在的距离或者焊接完成后的距离。

joint efficiency(接头效率) 焊接接头强度与基体金属强度之比，以%表示。

joit ramming(震捣) 通过工作台上的型砂、模型和砂箱作上、下震动使型砂紧实。振实机、振压机、震动机及振捣机都是利用这种原理的机器。也叫jar rammer(震动捣实机)。

jomminy test(顶端淬火试验) 见*end-quench hardenability test(端部淬火淬硬性试验)*。

K

karat(开,量金单位) 用确定金在合金中纯度的单位。在这个系统中，24开(24K)为纯度1000或纯金，最常用的首饰金如下所列：

开(K)标号	金含量(质量分数)
24K	100%(≥99.5%)
18K	18/24或75%
14K	14/24或58.33%
10K	10/24或41.67%

keel block(基尔试块) 一种标准试验铸件，用于钢和其他高收缩合金，该试件是像船的龙骨一样的矩形试棒。安置于大型冒口或补缩头的底部。仅有一根试棒的基尔试块称为Y-试块，有两根棒的称为双基尔试块。试件用矩形棒料加工而成，并将补缩头截去。

kerf(切口宽) 在切断过程中，所形成的切口宽度。

keyhole(穿孔熔池、深熔焊接) 一种焊接技术，利用集中热源(如等离子电弧)完全穿透工件，并在熔化的焊接金属前沿形成的一个孔。随着热源对熔化金属的扩展，其后面的小孔也将填满，以此形成叠珠焊缝(原文中"the hold"疑应为"the hole"——译者注)。

keyhole specimen(有刻痕的冲击试件) 一种形如键孔(即带有孔和键槽)的试件，通常用于冲击弯曲试验。也见*Charpy test(夏比试验)*和*Izod test(悬臂梁冲击试验)*。

killed steel(镇静钢) 为了把含氧量降低到在凝固时不至于发生碳和氧之间的反应，用强脱氧剂，诸如硅或铝对钢进行处理。

kiln(窑) 用于烘烤、干燥或烧炼耐火砖或耐熔材料的大型炉子，也用于煅烧矿石或其他物料。

K_{Iscc}(平面应变强度系数临界值) critical value of the plane strain-intensity factor的缩写，在一定的环境里，由于给定材料的应力腐蚀开裂，它会引起裂纹的扩张。

kish(石墨在生铁中集结) 熔融的过共晶铸铁冷却时，在其内部生成的游离形石墨。铸件中的石墨会向其上表面发生偏析，并且在铸件表面或紧接着的表面下积聚起来。

knife-line attack(刀切形侵蚀) 合金通常为稳定不锈钢的晶粒间腐蚀，当加热到敏感的温度范围后，腐蚀沿着与焊缝毗邻或接触的一条线而发生。

knockout(拆模,落模) (1)将铸件上的砂芯去除。(2)通过震动熔模铸造的铸型，将铸件和熔模从型箱里脱出。(3)将成形后的零件从冲压、模压、拉拔、锻造或镦头用的模具里脱出的装置。(4)在薄板金属上未能冲透的孔，故孔里还留有坯料，必要时得用手工将其去除。

Knoop hardness number(HK)(努氏硬度值) 利用一个菱边角度为172°30′和130°0′的菱锥体金刚石压头，在载荷作用下压出一永久性压痕。与上述作用载荷及其压痕面积有关的数值就是努氏硬度值。可由下面公式计算得出：

$$HK=\frac{P}{0.07028d^2}$$

式中，P为作用载荷(*kgf*)，d为压痕的长对角线长度(*mm*)。以努氏硬度值表示时，其测试载荷是规定的。

Knoop hardness test(努氏硬度试验) 在经过标定的机器上，使用规定菱边角度的菱锥体金刚石压头在一定条件下压入被测材料的表面，然后载荷撤销后，测量其长对角线的长度。

knuckle-lever press(肘杆式压力机) 一种重载、短行程的压力机，其滑块是由一单肘接头直接驱动，

并通过连杆和曲柄进行启闭，可以应用于压花、模压、精压整形、镦头、模锻和挤压(原文中“crack”疑应为“crank”——译者注)。

knurling(滚花) 在金属表面上压出图案，通常利用一个小的硬质辊子进行压制，其表面上有相应的花纹。

Kroll process(克劳尔法,钛化合物还原法) 一种金属海绵钛的生产方法，即通过四氯化钛与更为活泼的金属，如镁或钠进行还原。这种海绵再进一步加工为颗粒或粉末。

L

lack of fusion(不全熔透,LOF) 一种没有完全熔透的焊接接头状态。

lack of penetration(不全焊透,LOP) 一种焊接未曾达到规定要求的焊接接头状态。

ladle(钢包) 常衬以耐火材料的储存容器，用于运输和浇注液态金属。

ladle metallurgy(钢包冶金) 钢液在钢包里进行的脱气工艺。

lamellar tearing(层状撕裂) 受到强制约束的焊接金属因为收缩而产生能穿透其厚度的高应变，并由此发生在邻近焊接件基体金属里的一种撕裂。其撕裂的发生还由于粘聚力的降低，并与基体金属的加工方向有关，裂纹大致平行于熔线的方向，并貌似阶梯状。

laminate(层压制品) (1)一种复合金属，通常为平薄板的形式，由两层或多层的金属组成的复合金属经粘结成为结构件。(2)由两层或多层的粘结层所构成的金属产品。

lamination (1)(**起层**)。一种大致上沿金属加工表面产生剥离或脆化的缺陷。很可能是因为加工而造成有方向性延伸的缩管、气孔砂眼、接缝、夹杂物或偏析。这种起层也会发生在粉末冶金坯块里。(2)(**叠层件**)。在电工产品，如电动机里的一种电工薄板冲制件，将其形状一致的多片冲制件重叠制成定子或转子。

lancing(切割) (1)一种冲压工序，带材毛坯的单线切制而不会产生分离形的冲屑。主要用于成形加工中金属落料，或者为冲制零件裁切部分轮廓，特别适用于顺序冲模。(2)利用氧熔剂切割或氧气切割进行的穿轧(切割)工艺。

land (1)(**刃带**)。成形铣刀紧接切削刃的后面部分。(2)(**切削刃厚度**)。铰刀、钻头和丝锥的排屑槽之间的实体截面。(3)(**凸模刃背**)。凸模上平行于轴线，并与直径最大的刃口相邻近的部分。

lap(重叠) 一种表面瑕疵，形似接缝，是由于热态金属、毛刺飞边或锐棱经折叠后被轧压或锻击挤入表面却未能熔合成一体而形成的。

lapping(精研) 一种精加工工序，将很细的磨料砂粒搀入到研磨材料，如铸铁里。通过精研对工件进行精密加工，包括获得非常精确的尺寸、纠正形状上的微小误差、降低表面粗糙度以及配合表面的紧密结合。

laser(激光) 一种通过激发电子或分子跃迁到较低的能级上从而产生相干光集束的装置。激光(laser)一词也是通过激发辐射发射进行光放大(light amplification by stimulated emission of radiation)的字首组合词。

laser alloying(激光合金化) 见 *laser surface processing*(激光表面处理)。

laser beam cutting(激光束切割) 一种热切削工艺；利用激光束产生的热量使金属熔化或蒸发，以此切割金属的一种热切割工艺；是否采用气流喷射加速材料的去除可视情况而定。

laser beam machining(激光束切削) 利用一种高聚焦的单频准直光束对准工件上的冲击点，以此使其材料熔化或升华。

laser beam welding(激光束焊接,LBW) 一种焊接工艺，使用相干光集束照射连接处，以此产生的热量使材料融合在一起。

laser hardening(激光硬化) 一种表面硬化工艺，使用激光对表面快速加热，通过热量传导到工件内部使表面快速冷却，于是形成浅层的马氏体。

laser surface processing(激光表面处理) 连续输出为0.5~10kW的激光，用于改善表面的金相组织并形成相应的表面性质，而不会对整体性能产生不利影响。其表面改性有以下三种形式。第一种为转换硬化，对表面进行加热使之发生热扩散和固态转换。第二种为表面熔化，由熔化而快速淬火使其组织细化。第三种是表面(激光)合金化，合金元素加入熔池以改变表面的成分。通过激光表面的熔化和合金化而形成的特异组织，将使其电化学和摩擦学的特性得以改善。

latent heat(潜热) 当物质发生相变时，才会吸收和释放的热能。

lateral extrusion(侧向挤压) 通过容器的侧壁小孔对产品进行挤压的工序。

lath martensite(板条马氏体) 在$w(C)$低于1.0%左右的钢中，只有部分形成马氏体；而在$w(C)$低于

0.5%左右的钢中，则全部形成马氏体并呈现为成束平行排列的板条形体，其厚度为0.1~0.3μm。

lattice constants(晶格常数) 见 *lattice parameter(晶格参数)*。

lattice parameter(晶格参数) 在给定的晶体组织中，单元体任何侧边的长度。晶格参数也可表示为晶格点的坐标分量 x、y 和 z，此时它们为变量。

launder (1)(**出铁或钢槽**)。输送熔化金属的流槽。(2)(**洗矿槽**)。输送水中悬浮颗粒的箱形水道。

lay(加工纹理) 切削、磨削、研磨或其他加工之后，在表面明显留下的加工痕迹方向。

lead (1)(**导程**)。螺旋线旋转整一周，沿轴向前进的距离。(2)(**导锥**)。平面铣刀的切削刃外端，有少许锥度。

lead angle(螺旋升角、导程角) 切削刀具上排屑槽的螺旋角。

lead burning(铅烧) 铅焊的使用不当的术语。

leak testing(泄漏检测) 检查用于储存压力气体或液体的元件或系统里的介质是否逃逸的一种无损检测。利用不同类型的气体探测器的泄漏检测系统可以检查泄漏部位(探测或准确定位)、测定一个泄漏点或一个系统的泄漏率，或对泄漏进行监测。

ledeburite(莱氏体) 铁-碳系的共晶体，其组分为奥氏体和渗碳体。当奥氏体冷却到 Ar_1 即在冷却过程中，完成从奥氏体到铁素体或铁素体加渗碳体转变的温度以下时，奥氏体就分解为铁素体和渗碳体。

left-hand cutting tool(左旋刀具) 从端部看，其所有的排屑槽都是逆时针方向旋转远离而去的切削刀具。

Leidenfrost phemomenon(雷登弗洛斯特现象) 由于用液体介质(如水)进行淬火而形成包围在零件外面的蒸汽热层，从而导致冷却速率减缓的现象。因为蒸汽层的包围起到绝热层的作用，而致使冷却速度降低。

leveler line(矫平线痕) 在薄板或带材的表面上出现的垂直于平整辊压方向的线形压痕。在平整之后(但在拉伸之前)，这种线痕看上去就像用油石或砂布轻轻打磨过一样，一般可以通过适度的压延予以消除。

leveling(矫平) 通过减少或消除扭曲，使轧制的薄板、带材或中厚板平整化。也见 *stretcher leveling(拉伸矫平)* 和 *roller leveling(辊压矫平)*。

levigation (1)(**浮选**)。利用细末材料在液体中的悬浮作用，将其从粗粉末中分离出来。(2)(**漂浮分级**)。一种利用悬浮颗粒沉降速度将颗粒按大小分级的方法。

levigation melting(悬浮熔化) 一种感应熔化工艺，利用电磁场使熔化金属悬浮而避免其与容器相接触。

light drawn(轻度拉制) 不太准确的术语，是指在拉制线材、管材的产品时，只需比硬拉产品更少的冷压缩量。

lightly coated electrode(轻质涂层焊条) 用于电弧焊的焊条，由金属丝与通常为金属氧化物或硅酸盐的轻质涂料所构成，后者用于金属丝拉制后的涂敷，主要作用是使电弧稳定。对照 *covered electrode(涂料焊条)*。

light metal(轻金属) 一种低密度的金属，如铝、镁、钛、铍以及它们的合金。

limiting current density(极限电流密度) 用于能产生所要求电极反应的最大电流密度，而不会因极化而发生过度的负面影响。

limiting dome height(极限拱形高度,LDH) 一种力学试验，一般用未经润滑的金属薄板进行，试验模拟实际冲压成形工序中的断裂状态。

lineage structure(谱系组织) (1)在液态凝固的过程中因为枝晶间收缩，而引起的柱形枝晶平行分枝相对理想排列的偏离。这种偏离具有在方向上的从几分大到2°弧度(原文如此,弧度疑为角度之误——译者注)的变化。(2)一种由经延伸的二次晶粒组成的亚组织。

linear elastic fracture mechanism(线弹性断裂力学) 在一种包含有大小和形状均为已知的裂纹形瑕疵的组织中，用于测定能引起断裂不稳定性所要求的应力(或载荷)的一种断裂分析的方法。也见断裂力学和应力强度系数。

linear (tenile or compressive) strain(线性拉伸或压缩应变) 由于在初始线性尺度上力的作用而引起的其单位长度上的变化。将引起的长度增加定义为正。

liner (1)(**包衬**)。将镀层金属薄片置于作为心部合金的上面，然后进行辊轧，以此将薄板包覆成为一种复合材料。(2)(**模衬**)。在挤压中使用的一种可卸式的合金钢圆柱形挤压腔，其轴向外锥体牢固地安装在压力机的轴孔或主机机身上，坯料放在里面进行挤压。

line reaming(同轴铰孔) 对一个工件上的不同截面上的同轴孔同时进行铰孔加工，所用的铰刀上有不止一个的保持着一定同轴度要求的切削面或导向表面。

lip-pour ladle(带嘴浇包) 一种浇包，很像水桶浇水似地将熔化金属从嘴形出口倒出。

liquation(熔析) (1)将低熔点的合金组分从遗留的组分中分离出来，通常明显指具有宽熔化范围合金。(2)合金的不完全熔化，通常是因晶内偏析或其他成分的不均匀性所造成的。

liquation temperature(熔析温度) 合金能发生不完全熔化的最低温度，这时发生偏析的可能性最大。

liquid carburizing(液体渗碳) 通过将钢浸入由氰化物和其他盐类组成的熔槽里使其表面硬化。

liquid honing(液体研磨) 利用含有细微研磨颗粒的气流将化学乳化液直接喷射到被加工表面上，以此得到很低的抛光表面粗糙度。

liquid metal embrittlement(液体金属脆化，LME) 原本为塑性的金属由于接触了一种液体金属，以及随后的拉伸受力，从而导致突发性脆性断裂。也见 *solid metal embrittlement(固体金属脆化)*。

liquid nitriding(液体渗氮) 在亚临界温度下，将零件放在含有氰化物和氰酸盐的氮基熔盐浴槽里，进行处理的一种表面硬化技术。

liquid nitrocarburizing(液体氮-碳共渗) 在下临界温度以下，利用熔化液体盐浴槽进行的一种氮-碳共渗工艺(氮和碳都被渗入表面)。

liquid penetrant inspection(液体渗透剂检测) 一种用于确定那些向着金属表面开口的缺陷位置的无损检测方法，首先用渗透着色剂或荧光液体渗入缺陷，再把多余的渗透剂擦去，然后使用一种显示剂使渗透剂渗透显露缺陷，并作为标记进行记录。液体渗透剂检测适用于铁质和非铁材料，但是对于探测无孔隙固体上的外露表面缺陷，其作用有限。

liquid phase sintering(液相烧结) 在烧结零件的操作过程中，在存在液相的条件下将坯块进行烧结或使疏松的粉末凝聚。

liquid shrinkage(液体收缩) 当液态金属冷却到液相线时，其体积的收缩。

liquidus(液相线) (1)金属或合金成为完全液态时的最低温度。(2)在相图中，系统的不同成分组成在冷却过程中开始凝固的温度或在加热过程中结束熔化的温度所代表点的轨迹。也见 *solidus(固相线)*。

loading (1)(**切屑瘤**)。在用刀具切削的过程中，来源于工件上的材料粘附在切削刃背后上，成为一种不利于切削的积瘤。(2)(**砂轮钝化**)。在磨削过程中，砂轮里的孔隙都由工件上的材料填满，通常都是因此造成生产率和加工质量的降低。(3)(**装料**)。在粉末冶金中，用粉末填满模型空腔。

loam(型泥) 一种由砂子、粘泥和粘结剂混合而成的造型材料，通常在制造钢或铁的大型铸件时，作为砖体或其他结构性辅助材料使用。

local action(局部作用) 由于“局部电池”作用，即处于电解液里的金属表面上相邻区域之间的不同性质所形成的原电池作用而造成的腐蚀。

local cell(局部电池) 由于处于电解液里的金属表面上，相邻区域之间的不同性质所形成的原电池。这种不同性质可以是金属或其所属介质的化学性质或物理性质。

local current density(局部电流密度) 在一点或一个很小的区域上的电流密度。

localized corrosion(局部腐蚀) 分散分布的腐蚀，例如裂隙腐蚀、点蚀和应力腐蚀开裂。

localized precipitation(局部沉淀) 类似于 *continuous precipitation(连续沉淀)*的过饱和固溶体形成的沉淀，而不是在诸如沿滑移面、晶界或断续孪晶边界的那些易发性部位所形成的沉淀颗粒。

lock(定位) 在锻造中，指锻件披缝不完全在同一平面上的一种情况。这时发生两个或更多的平面变化，称为复合定位。这时在模具上设置一个定位，用于补偿因其陡坡定位而造成模具的移位，它也称为交互定位。

longitudinal direction(纵向) 经加工的材料上，与最大延伸方向相平行的方向。也见 *normal direction(法向)*和 *transverse direction(横向)*。

longitudinal field(纵向磁场) 在一个经过磁化零件的磁场，从一极或多极向另外的一极或多极的延伸，并且通过零件外面的路径形成其回路。

longitudinal resistance seam welding(纵向电阻缝焊) 基本上沿与电阻焊焊缝厚度相平行的方向进行电阻线缝焊。

long transverse(宽度方向) 见 *transverse direction(横向)*。

looping mill(环形轧机) 一种热轧机的配置方式，其热轧棒材从一台轧机中出来，以反方向进入下一台。

loose metal(松料) 指冲压件上因成形不足而有些松弛的区域。可能会与 oil canning(铸板凹陷)相混淆。

lost foam casting(失泡铸造) 一种消耗型模型浇铸工艺，用聚苯乙烯制成的消耗性模型外面围之以松散的砂子，当熔化金属浇入模型里时，模型就蒸发失去。

lost wax process(失蜡铸造) 一种使用蜡模的熔模铸造工艺。

lot(批量) (1)使用一种工艺并保持其制造条件不变、一次生产的特定数量的材料，并以此作为一个数量单位供货。(2)一定数量的材料，其规定的一种或多种性质，如同位素、化学和物理特性都可认为是一致的。(3)一定量的有相似成分的散装材料，其性质有待分析。与 *batch(批货)* 相比。

low-alloy steels(低合金钢) 一种类别的铁质材料，它具有比普通碳素钢更好的力学性能，是添加了如镍、铬、钼的一些合金元素的结果。总的合金含量(质量分数)从2.07%至不超过不锈钢的合金含量，如 w(Cr)最低10%。

low-cycle fatigue(低周疲劳) 以相对较少的周数(<10^4周的疲劳)发生的疲劳。低周疲劳会伴生一些塑性或永久的变形。比较 *high-cycle fatigue(高周疲劳)*。

lower ram(下锤) 气动或液压压力机中的一个零件，它在下缸体中运动，并将压力传递给下凸模。

low-hydrogen electrode(低氢焊条) 一种涂敷电弧焊条，它为电弧和熔化的焊接金属提供气氛保护，其焊接金属有低氢含量。

low-residual-phosphorus copper(低残余含磷铜) 含残余磷量(通常 w(P)为0.004%~0.012%)的脱氧铜，一般其含量较低，还不会明显降低铜的导电性。

lubricant(润滑剂) (1)夹在两个作相对运动的表面之间的物质，其目的是减少两者之间的摩擦和磨损。(2)用于压模、铸模、冲头或工件上的一种材料，可以促进金属的流动，减少摩擦和磨损，并有助于工件在压制后从模具里脱离出来。

lubrication(润滑) (1)在两个承载表面之间使用的一种润滑剂，以此降低摩擦阻力、磨损及其他形式的表面损坏。(2)在一种粉末中混合或掺和润滑剂，有利于坯块的压紧及从模腔里的脱出，还可以在凹模和/或凸模的壁上使用润滑剂。

Lüders lines(吕德斯线) 在金属薄板上的表面压痕或凹痕，通常可以用肉眼看到，它们是由于断续(不均匀)屈服造成的。即所谓的吕德斯带、哈特曼线(Hartmann line)、皮奥伯特线(Piobert line)或拉伸应变。

luster finish(光亮加工) 对经磨削的金属辊子进行光整辊压而获得的光亮，它适合于用装饰性涂层或镀层，但是通常在成形后还需另加表面处理。

M

machinability(切削性) 金属切削的相对容易程度。

machinability index(切削指数) 在规定的标准条件下，工程材料切削加工性的相对度量。即所谓的切削评定。

machine forging(机锻) 在镦锻机或卧式锻造机上进行的锻造。

machine welding(机焊) 在焊接人员的持续监控下，由设备进行的焊接。工件的装卸是否用设备完成可视情况而定。也见 *automatic welding(自动焊)*。

machining(切削加工) 使用切削刀具从金属零件上去除材料，通常使用有动力驱动的机器。

machining allowance(切削裕量) 见 *finish allowance(加工裕量)*。

machining damage(切削损伤) 因切削或磨削工序给材料表面造成的粗糙或变异，由此给材料/零件的使用性能带来不利影响。

machining stress(切削应力) 因切削形成的残余应力。

macrograph(宏观图像) 经制备的试件表面在放大倍数不大于25倍的条件下的表面图像。如果采用拍照，得到的就是所谓的宏观图像照片。

macrohardness test(宏观硬度测试) 用于指洛氏、布氏的硬度测试方法，与以显微压痕硬度测试的维氏、努氏相区分。

macroscopic stress(宏观应力) 距离上能与应变测量仪的标样长度相比拟的材料残余应力(即与之相对的是类似单个晶粒的非常小的特定范围里的应力)。比较 *microscopic stress(微观应力)*。

macroshrinkage(宏观收缩) 存在于铸件里的分离的、成团的或相互连接的孔穴，可以用宏观观察进行检测。这些孔穴通常都与其截面大小的突变有关，而且是在凝固收缩时，由于补缩不足所致。

macrostructure(宏观组织) 对一个经抛光、腐蚀的样件表面进行宏观检查所观察到的金属组织。

magnetically hard alloy(硬磁合金) 见 *permanent magnet material(永磁材料)*。

magnetically soft alloy(软磁合金) 见 *soft magnetic material(软磁材料)*。

magnetic-analysis inspection(磁分析检测) 一种检测铁磁材料在恒定截面上磁通量变化的无损检测方法，其变化是由于缺陷或硬度的变化而引起的。这种变化通常以示波器屏幕上显示的图案变化来反映。

magneric-particle inspection(磁粉检测) 一种检查铁磁材料的表面裂纹及类似缺陷的存在及其严重程度的无损检测方法。用于磁性零件上的磁粉细微颗粒被吸附，并勾画出由断裂缺陷所形成的任何磁漏场图形。

magnetic pole(磁极) 在磁性零件上，磁场进入或离开零件的区域。它是磁体上吸力最大的一点。

magnetic separator(磁性分离器) 一种用于将磁性材料与少磁性或非磁性材料分隔开的装置。经碾碎的材料用传送带输送经过一个磁性物体。

magnetizing force(磁化力) 因电流流过或因磁化物体所形成的力场，它会产生磁感应。

magnetostriction(磁致伸缩) 物体因为磁场作用而引起的尺寸变化。

malleability(可锻性) 金属受到压缩发生塑性变形而不会断裂的特性。也见 *ductility(塑性)*。

malleabilizing(退火、脱碳) 白口铸铁的一种退火，将部分或全部的结合碳转移到石墨中去，或者在某些情况下将一部分碳全部去除。

malleable iron(可锻铸铁) 白口铸铁经延长退火而生成的铸铁，在其过程中发生脱碳、石墨化，或两者兼而有之，以此消除部分或全部的渗碳体。石墨是一种回火碳的形态。如果脱碳是其主要反应，产品则会呈现出轻微的断裂表面，故为白心可锻铸铁。反之，断裂表面为黑色的，故为黑心可锻铸铁。美国只生产黑心可锻铸铁。铁素体可锻铸铁主要为铁素体基体；珠光体可锻铸铁则含有珠光体、球状渗碳体或回火马氏体，这取决于热处理和硬度要求。

mandrel(心轴) (1)一种头部倒角的轴销或圆棒，用于在加工过程中固定中空金属产品的空腔。(2)一种金属芯棒，其他金属在其周围进行铸造、弯曲、成形或定形。(3)一根轴或圆棒用于固定被切削加工的工件。(4)一种模型，如铸模或胎膜，在 *electroforming(电铸)* 中作为阴极使用。

mandrel forging(心轴锻造) 一种以心轴轧制或锻造中空毛坯的工艺，生产无焊、无缝的环形或管形零件。也见 *radial forging(径向锻造)*。

Mannesmann prodess(曼内斯曼工艺) 制造无缝钢管的管坯穿孔的工艺。坯料在两个交叉成一角度的重型轧辊之间旋转，并迫使其从一固定着的心轴通过。

manual welding(手工焊) 一种完全用手工操作和控制的焊接工序。也见 *automatic welding(自动焊)*、*machine welding(机焊)*。

maraging(高强度热处理、马氏体时效处理) 应用于特种高镍铁基合金(高镍合金钢)的一种析出硬化处理，将一种或多种金属间化合物沉积于基本上是无碳马氏体的基体上。

Marforming process(橡胶膜压制成形工艺) 橡胶膜成形工艺，用于成形无皱收缩翻边和深度拉伸的壳体。它与格林工艺的不同之处在于，成形加工之前将金属薄板毛坯夹在橡胶垫与坯料固定模之间。

marquenching(马氏体等温淬火) 见 *martempering(马氏体等温回火)*。

martempering(马氏体等温回火) (1)一种淬火工艺规范：将奥氏体铁质材料用适当的介质在刚刚高于材料的马氏体开始相变的温度里进行淬火，并在介质中保持到温度完全均匀，尽管时间还不够其形成贝氏体，还是接着在空气中冷却。如此处理后往往需再进行回火。(2)当将该工艺应用于渗碳材料时，控制马氏体开始相变温度也就是对渗碳层的控制。这种不同的工艺也常称为马氏体等温淬火。

martensite(马氏体) 是由无扩散相转变所形成的显微组织的一般性使用术语，在这种转变中，其母相和子相具有特定的晶体学关系。马氏体是以铁合金和非铁合金的显微组织中的针尖状图形为特征的。在合金中溶质原子所占据的若是马氏体晶格的填隙位置(如碳在铁里的位置)，其组织就变得硬且有高度应变；然而溶质原子占据的若是替代位置(如镍在铁中的位置)，则马氏体就变得软且有塑性。在冷却中，转变为马氏体高温相的数量在很大程度上取决于所能达到的最低温度，这是一个与起始温度(Ms)相差很大的温度，并且也是一个转变基本完成的温度(Mf)。也见 *lath martensite(板条马氏体)*、*plate martensite(板形马氏体)* 和 *tempered martensite(回火马氏体)*。

martensite range(马氏体转变区) 马氏体转变从开始(Ms)到马氏体完成(Mf)之间的温度范围。

martensitic(马氏体式的) 具有类似于马氏体形态和形成机制的板状组分。也见 *lath martensite(板条马氏体)* 和 *plate martensite(板形马氏体)*。

martensitic transformation(马氏体转变) 发生在某些金属冷却过程中的反应，由此生成的针状组织被称为 martensite(马氏体)。

master alloy(母合金) 富含一种或多种所要求的合金元素的合金，将其加入到熔化的金属里以提高所要求的组分的质量分数。

master alloy powder(母合金粉末) 一种具有高合金含量浓度的预制合金金属粉末，当将其与一种基体

粉末相混合时，就可以稀释成为所要求的成分。也见 *prealloyed powder*（*预制合金粉末*）。

master pattern（**主模型**） 用于翻砂造型的一种包含双倍收缩余量的模型，可将用以制造的铸件再作为翻砂用的模型使用。

match（**对模**） 指的是一种状态，即金属成形或锻造模的半模上的一点，应同与之相对应的另一半模上的相应点按公差对准。

matched edges（**基准边**） 模面上的两条精确加工成90°的棱边，模具型腔上的所有尺度的确定都是以它们为准的，并用于使模具与锻压设备对准。即所谓的对模线。

match plate（**分型板**） 一块金属板或用其他材料制成的板，制造金属铸件的模型就安装在其上面（或将其制成为一个整体零件），以便于造型。模型就沿此板为分型面剖分。

material characterization（**材料特征化**） 使用不同的分析手段（光谱、显微镜、色谱等）、分析材料（整体的或表面的）的成分和组织（包括缺陷）特征，这些特征对于其特别处置、性质研究和使用都极具意义。试验方法还能得到主要跟材料性质，如热学、电学及力学性质有关的各种数据，而这些试验方法并不包含在这个术语的定义里。

matrix（**基体**） 一种连续或主要的物相，而其他的组分都分散在这些相里。

matte（**锍、冰铜**） *smelting*（*熔化*）过程中的一种中间产品，将经焙烧的硫化物矿石，如铜、铅或镍的矿石熔化得到一种不纯的金属硫化物的混合物。

matte finish（**亚光饰面**） （1）薄板或带钢由经喷砂粗糙化处理的轧辊轧制后而形成的一种暗淡无光的表面纹理。（2）某些电沉积（如镉或锡）的无光表面粗糙度特征。

maximum stress（S_{max}）（**最大应力**） 在应力循环中，代数值最大的应力，拉应力为正，压应力为负。名义应力是最普通的应力。

maximum stress intensity factor（K_{max}）（**最大应力强度系数**） 在疲劳循环中的应力强度系数的最大值。

McQuaid-Ehn grain size（**奥氏体晶粒度尺寸**） 钢经927℃（1700℉）下的渗碳后，再缓慢冷却所形成的奥氏体晶粒度大小。奥氏体晶粒度大小组织的评定标准分为八级，1级为最粗，而8级为最细。推荐使用标准的ASTM方法测定晶粒度大小。

mean stress（S_m）（平均应力） 在再一个循环中的最大和最小应力的代数平均值，也即 $S_m=(S_{max}+S_{min})/2$。也将其称之为应力的稳定分量。

mechanical alloying（**机械合金化，MA**） 对两种或多种硬度差别很大的粉末颗粒，交替进行冷态熔合和撕裂的工艺过程。其运作是在高强度球磨机，如碾磨机里进行的，是一种生产氧化-弥散-强化（ODS）材料的首选方法。也见 *attritor grinding*（*碾磨磨削*）和 *dispersion-strengthened material*（*分数强化材料*）。

mechanical hysteresis（**机械滞后**） 在弹性极限内通过一个加载和卸载的完整循环所吸收的能量，可以用一条加载和卸载的闭环应变曲线表示。有时候也称之为弹性滞后，但更确切的应是机械滞后。

mechanical metallurgy（**力学冶金学**） 关于在力作用下的金属性状的科学和技术，常限于金属的塑性或成形加工。

mechanical plating（**机械渗镀**） 是一种用翻滚或其他方法将金属细粉末对工件进行扩散的渗镀。这种工艺主要为铁质零件提供锌、镉、锡，以及这些金属不同组合合金的镀层。

mechanical polishing（**机械抛光**） 一种完全通过切削加工使表面产生镜面反射的工艺，起切削作用的是悬浮在液体中的研磨颗粒锐角，而这种液体又包含在抛光布的纤维中。

mechanical press（**机械压机**） 用曲轴、偏心轮、凸轮、曲柄连杆以及其他机械机构驱动滑块运动的压力机。

mechanical properties（**力学性能**） 当材料被施以作用力时能表现出的弹性和非弹性特性，以此表现其机械用途的适用性，例如弹性模量、抗拉强度、塑性、硬度和疲劳极限。比较 *physical properties*（*物理性能*）。

mechanical testing（**力学试验**） 用于测定金属的力学性能的方法。

mechanical twin（**机械孪晶**） 通过外界加热下的简单剪切而使晶体变成孪晶。

mechanical working（**机械压力加工**） 为了改变金属的形状和性能，金属受到轧辊、锻锤或压力机所施加的压力。

median fatigue life（**疲劳寿命中值**） 在一致的条件下进行试验的一组试件中，当各单个试件的疲劳寿命测值都按大小排列时，取其中间值。若试验的试件为偶数，就用最中间的两个值的平均数。通常都优先采用样本的中值，而不是用算数均值（即平均值）。

median fatigue strength at *N* cycles（***N* 周的疲劳强度中值**） 经 *N* 周循环试验，有50%的样本数没发生

损坏的应力估计值。这个估计值是从疲劳寿命分布的一个特定点求出的，因为没有一种试验方法可以直接测出在 N 周的疲劳强度的频数分布。

melting point(熔点) 一种纯金属、化合物或共晶体从固体转变为液体的温度，这是一个其液体和固体处于平衡的温度。

melting range(熔化范围) 一种合金，而并非化合物或共晶体由固体变为液体的温度范围，对于相图上的任何给定成分就是从固线到液线的温度范围。

melting temperature(熔化温度) 见 *melting point(熔点)*。

melting-through(熔透) 从一边焊接的接头被完全熔化穿透。

merchant mill(obsolete)(条钢轧机(已不用)) 一种由一组三辊轧机组成的轧机机组，各机按直线排列，并由一个动力单元驱动，用于轧制圆钢、方钢或扁钢，其尺寸比用棒材轧机轧制得要小。

mesh(目) (1)筛面上每英寸长度中的开口数，也称目数。(2)能够让粉末样品颗粒几乎全部通过的按照标准规定的筛面尺度的最细筛面目数。也见 *sieve analysis(过筛分析法)* 和 *sieve classification(过筛分级法)*。

mesh-belt conveyor furnace(织带传送炉) 一种连续运行的炉子，利用传送带运送炉料。

metal(金属) (1)不透明、有光泽的单质化学物质，是一种良好的热、电导体，而且若经抛光，能很好地反射光线。大部分的单质金属都是可锻的和可塑的，而且其密度一般都比其他物质的大。(2)从组织结构上看，金属与非金属元素都可通过其原子键连接与电子有效性进行区分。金属原子的外层电子有失去的倾向，于是成为正离子并由因分离形成的电子气将其聚集在一起。这种“自由电子”携带电流的能力以及这种能力随温度的升高而降低的表现，构成了各金属固体的主要特征。(3)从化学角度看其单质物质的氢氧化物均为碱性。(4)一种合金。

metal arc cutting(金属电弧切割) 任何利用金属电极与基体金属之间产生的电弧热，进行熔化并切割金属的电弧切割工艺。也见 *gas metal arc cutting(气体金属电弧切割)* 和 *shielded metal arc cutting(保护金属极电弧切割)*。

metal arc welding(金属电弧焊) 任何一种利用金属电极与工件之间产生的电弧热进行熔合的电弧焊接工艺。最好用规定的工艺名称。

metal cored electrode(金属药芯焊条) 一种复合焊条，由含有合金成分的金属管或其他空心构件组成。少量的成分有利于电弧的稳定和氧化物的熔化。是否使用外保护气体可视情况而定。

metal dusting(金属尘土化) 高温下，使金属在碳素气体中加速劣变成为粉尘状的腐蚀物。

metal electrode(金属焊条) 用于弧焊或弧切割的焊条，用金属丝或棒制成，它可以是裸露的或经适当涂敷或涂层而成的。

metallic glass(金属玻璃) 一种非晶体金属或合金。通常利用分子沉积使熔化合金发生急剧过冷而成，沉积包括通过气相(如热蒸发和喷溅)或液相(如无电沉积和电沉积)而增大，或者利用外部作用的技术(离子注入和离子束混合)。

metallizing(金属喷镀) 利用熔化金属的雾化喷射或真空沉积形成金属镀层。也称为喷射金属化。

metallograph(金相) 利用专用光学显微镜，对不透光材料经过制备的表面进行肉眼的观察和显微照相，其放大倍数为25至约2000倍。该仪器包括一个高强度的光源、显微镜和照相盒。某些仪器上还有用偏振光、相差衬托、斜射光源、暗场光源和明场光源的装置，用于观察试件表面。

metallography(金相学) 用不同的手段特别是光学显微镜和电子显微镜分析金属和合金的组织。

metallurgical bond(冶金学键) 将金属结合在一起的主要粘结键，在所有的焊接工艺中，它都是形成于基体金属与钎料之间。这是当一团金属原子紧密地聚集在一起时，价电子波函数不断地在空间延伸而产生的主价键。也称为金属键。

metallurgical coke(冶金焦炭) 一种通常为低硫分的焦炭，高温下具有非常高的抗压强度；其在冶金炉里不仅用作燃料，而且还能支承炉料的重量。

metallurgy(冶金学) 关于金属和合金的科学与技术。工艺冶金学是指从矿石中提炼金属及其冶炼；物理冶金学是指受成分、工艺处理及环境条件所影响的金属物理性能及其力学性能；力学冶金学则是指金属对于作用力的响应。

metal-matrix composite(金属基复合物) 在金属基体中添加非金属增强剂，如陶瓷纤维或细丝的材料。

metal penetration(金属粘砂) 金属铸件的一种表面状态，金属或金属氧化物填充在砂粒之间的孔隙里，而未能使其去除。

metal powder(金属粉末) 通常大小范围为0.1～1000μm的单质金属或合金的颗粒。

metal powder cutting(金属粉末切割) 一种利用铁

粉或铁-铝混合粉末的流束辅助氧气割炬的技术，以此促成难以切割材料的火焰切割。粉状金属能扩大和加速被切割材料的氧化反应，及其熔化和粉碎作用。

metal spraying(金属喷镀) 向金属表面喷洒熔化金属，用于金属物体镀层。也见 *thermal spraying(热喷涂)*。

metastable(亚稳态) (1)鉴于某些转变、转化或反应，使材料能达到的真正稳定状态，但只是由于快速冷却或某种分子特性，例如聚合物的极高粘度而形成一种动态稳定化。(2)处于一种准平衡状态，具有高于实际平衡状态所有的自由能量。

***Mf* temperature(*Mf*温度)** 对于任何合金系统，在其冷却中的马氏体转变得以基本完成的温度。也见铁质合金的定义中提到的相变温度。

microcrack(微裂纹) 具有显微尺度的裂纹。也用术语 *microfissure(微裂缝)*。

microfissure(微裂缝) 具有显微尺度的裂纹。

micrograph(显微照片) 放大倍数高于25倍的试件表面图像复制。如果使用照片拍摄的方法就叫做photomicrograph(显微金相照片)，但不是microphotograph(缩微照相)。

microhardness(显微硬度) 利用如维氏或努氏压头以非常轻的力作用于材料表面测得的材料硬度，通常压出的压痕也非常小，需用显微镜才能测量。它能够测出组织中不同显微组分的硬度，或能够测出表面淬火中常见的硬度急速变化梯度。也见 *microhardness test(显微硬度测试)*。

microhardness number(显微硬度数值) 一般性使用术语，更准确的技术用术语为 *microindentation hardness number(显微压痕硬度数值)*。

microhardness test(显微硬度测试) 显微压痕硬度测试使用经过标定的仪器，将一个金刚石压头以1～1000g的力作用于测试材料的表面，然后用光学的方法测量其一根或两根对角线的长度。也见 *Knoop hardness test(努氏硬度测试)* 和 *Vickers hardness test(维氏硬度试验)*。

microindentation(显微压痕) (1)在硬度测试中，用一个压头，典型的是金刚石的棱锥体测头，当将其压入表面后随即离开，这时小的压痕被遗留在固体表面。通常测量显微压痕的尺寸可得出显微压痕硬度数值。(2)指用一个规定几何形状的硬测头缓慢地以法线方向压入固体表面的过程，通常就是用于测出其显微压痕硬度数值。也见 *Knoop hardness number*(努氏硬度数值)、*microindentation hardness number*(显微压痕硬度数值)和 *Vickers hardness number(维氏硬度数值)*。

microindentation hardness number(显微压痕硬度数值) 通常以压力单位(公斤/毫米^2)表示的一种数值量，它代表一个规定几何形状的硬测头在规定的法向力作用下缓慢压入时固体表面所受到的阻力。词头micro-(显微)表示产生压痕截面的横向尺寸一般在10.0～200.0μm。也见 *Knoop hardness number(努氏硬度数值)*、*nanohardness test(纳米硬度测试)* 和 *Vickers hardness number(维氏硬度数值)*。

microscopic(显微观察) 放大倍数高于25倍的观察。

microscopic stress(微观应力) 在能与晶粒大小比拟的距离内的材料残余应力。也见 *macroscopic stress(宏观应力)*。

microsegregation(微偏析) 在晶粒、晶体或小颗粒内的偏析。也见coring(成核化)。

microshrinkage(微缩) 无法用显微观察发现的由晶枝间的孔隙构成的铸造缺陷。微缩的形成是因为在凝固时没有适宜的机会以补缩材料补偿收缩。具有较大凝固温度范围的合金对此尤为敏感。

microstrain(微应变) 其计量长度可以与原子间距相比拟的应变。这也是一些用宏观应变测量进行平均而得到的应变。以现有的技术是无法测量微应变的，然而用X-射线能测量不同的微应变分布。

microstress(微应力) 同 *microscopic stress(微观应力)*。

microstructure(显微组织) 用放大倍数高于25倍的显微镜观察到的物体、有机体或材料的组织结构。

middling(中矿) 介于精矿与尾矿之间的中间产品，它含有足够的、值得处理的矿石。

MIG welding(金属极惰性气体保护焊) 即Metal inert-gas welding，见优先选用术语 *gas metal arc welding(气体保护金属极电弧焊)*。

mild steel(软钢、低碳钢) w(C)最高约为0.25%，并含有w(Mn)为0.4%～0.7%的锰、w(Si)0.1%～0.5%的硅和一些残余的硫、磷及其他元素的碳钢。

mill (1)(**轧钢厂**)。金属经熔化、浇铸或冷、热变形加工成标准型材，以供二次生产而成为商业产品的生产厂家。(2)(**轧钢机组**)。一般由四台或更多的轧钢机组成的生产线，将金属热轧或冷轧成为标准形状，例如型材、棒材、中厚板、薄板或带材。(3)(**轧钢机**)。单台轧钢机，用于热轧、冷轧或挤压金属，如包括初轧机、多辊轧钢机、四辊式轧机和Sendzimir轧机(森氏极薄钢板多辊轧机)。(4)(**铣

刀)。铣刀的工厂用语。(5)(**碾磨机、粉碎机**)。用于磨碎或粉碎矿石或其他矿产品的机器或机组。(6)(**研磨机**)。用于研磨和混合材料的机器，如球磨机、涂料磨盘。(7)(**碾磨或混料**)。对材料进行碾磨和混合，如碾磨、混合一种冶金材料的粉末。

mill edge(轧边) 在热轧金属薄板时，生产的规整料边。当热轧薄板还要进一步加工成冷轧板时，这种料边照例还要进行裁切。

Miller indices(米勒指数) 用一组整数标称任何一个晶体系统里的平面及其方向的方法。一个平面指数与该平面在单位晶体坐标轴上的截距有关；而方向指数则与多重晶格参数有关，它们代表了与该方向平行，并在单位晶体中任取一点为坐标原点，且通过该原点的一条直线上某一点的坐标值。

mill finish(轧制品光洁度) 一种轧制产品上的非标准(及通常为不均匀)的表面粗糙度，这种表面粗糙度是在终加工或热处理工序之后得到的，无需再进行专门的表面处理(不指防腐处理)。

milling(machining)(铣削) 用铣刀切除金属。

milling(powder technology)(研磨) 材料的精磨技术，通常在球磨机里改变颗粒的大小和形状，让混料里的组分相互涂敷，或形成组分的均匀分布。

milling cutter(铣刀) 一种旋转的切削刀具，它有一个或多个切削刃口，称之为刀齿，间断地切上工件，并通过工件与刀具之间的相对运动将材料去除。

mill product(轧制品) 轧机的商业产品。

mill scale(轧制锈皮) 在金属的热变形加工或热处理过程中生成的厚氧化皮。

mineral dressing(选矿) 利用物理或化学的方法使原矿石富集成为一种值得从中进行提炼的产品。

minimized spangle(细小锌花) 一种晶粒非常小的热浸镀锌镀层。零件经过涂层后，使这些锌花都基本上见不到了。

minimum bend radius(最小弯曲半径) 当金属产品按照一定的角度弯曲时，在不发生断裂的前提下所能达到的最小半径。

minimum stress(S_{min})(最小应力) 在疲劳过程中，应力在其循环中的最小代数值，拉应力为正，压应力为负。

minimum stress-intensity factor(K_{min})(最小应力强度因数) 在疲劳中，应力强度因数在一个循环中的最小值。当载荷比 >0 时，这个值相当于最小载荷，当载荷比≤0 时，其值取零。

minus sieve(筛下) 粉末样品中，能通过特定号数的标准筛子的那部分粉末。也见 *plus sieve(筛上)* 和 *sieve analysis(过筛分析法)*。

mischmetal(稀土金属混合物) 稀土元素(相对原子质量为 57 ~ 71)的一种金属形式的天然混合物，w(Ce)约为 50%，其余主要为镧和钕。

mismatch(错模、位错) 在对上、下锻模调整对齐后所存在的位错或误差。也用于指压制成的锻件上位错情况。

misrun(铸件缺肉) 由于浇铸温度过低、透气性不够形成气体背压或由于浇口的安排不合适，而造成的浇铸不足，从而导致金属表面出现的凹凸不平。

mixed potential(混合电位) 当发生两种或更多种电化学反应时的试件(或电偶试件)电位。也叫电偶电位。

mixing(混合) 粉末冶金中两种或多种粉末的完全混合(不要与 *blending(调和)* 相混淆)。

modification(改性) 熔化的亚共晶(w(Si)为 8% ~ 13%)或过共晶(w(Si)为 13% ~ 19%)的铝-硅合金处理，以此通过改善硅相的大小和分布来提高固体合金的力学性能。包括添加少量的钠、锶或钙(亚共晶合金)，或磷(过共晶合金)。

modulus of elasticity(E)(弹性模量) (1)材料刚性或韧性的度量，在比例极限以下的应力与其相应的应变之比。如果 13.8MPa(2.0ksi)的拉应力引起 1.0% 的伸长率，则弹性模量就为 13.8MPa(2.0ksi)除以 0.01，即 1380MPa(200ksi)。(2)用应力-应变曲线表示，弹性模量就是应力-应变曲线中应力与应变成正比的线性部分的斜率，也就是为大家所熟知的 *Young's modulus(杨氏模量)*。对于在整个弹性部分都不遵循胡克定律的材料而言，可以取在应力-应变曲线的原点或低应力处的切线、或从原点到应力-应变曲线任何特定点的割线、或连接应力-应变曲线上任何两特定点的弦线，以它们的斜率作为其弹性模量。按这些不同的情况，模量就分别称之为切线模量、割线模量或弦线模量。

modulus of resilience(回弹模量) 当材料加载到其弹性极限时所储存的能量。它可以通过计算直至其弹性极限时的应力-应变曲线以下的面积来确定。也见 *resilience(回弹)* 和 *strain energy(应变能量)*。

modulus of rigidity(刚性模量) 见 shear modulus(切变模量)。

modulua of rupture(断裂模量) 弯曲试验中在断裂点上的名义应力。弯曲断裂模量是断裂时的弯矩除以其截面的模量，而扭曲断裂模量是断裂时的转矩

除以其极面模量。

Mohs hardness(莫氏硬度) 由莫斯提出的，根据十种矿石每一种都能在其后面一种上划出刻痕而确定的硬度。这些矿石的硬度按降序排列如下：

金刚石	10
刚玉	9
黄玉	8
石英	7
长石	6
磷灰石	5
氟石	4
方解石	3
石膏	2
滑石	1

mold (1)(**铸型**)。用砂子、金属或耐熔材料制成的铸模，其里面有凹腔，将熔化金属倒进去得到所需形状的铸件。(2)(**模具**)。锻模。

mold cavity(型腔) 铸型内的空间，将液体金属填入，待凝固后，便可形成铸件。液体金属进入型腔的通道(直浇口、流道、浇口)和用于储存液体金属的部分(冒口)都不属于真正的型腔部分。

molding machine(造型机) 制造砂型的机器，即以机械的方式将模型周围的型砂紧实。

molding press(模压机) 用于制造粉末冶金坯块的压力机。

molding sands(型砂) 翻砂用砂子，含有超过5%的天然泥土，通常为8%~20%。

mold jacket(模套) 套在砂型外的木板或金属模板，在铸件浇铸时可起支撑作用。

mold wash(铸型涂料) 含水或酒精的乳化剂或不同材料的悬浮液，用于涂敷于铸型的内腔表面。

molten weld pool(焊接熔池) 焊接金属凝固前焊缝的液体状态。

Mond process(蒙德工艺) 一种镍的萃取和纯化工艺。其主要特点是通过用细微金属与一氧化碳的还原反应生成碳酰镍，然后分解碳酰镍，使经纯净化的镍沉淀在小的镍粒靶上。

monotectic(偏共晶) 一种在二元系统里的等热可逆反应，在其系统里一种液体在冷却中分解成为不同成分的第二种液体和一种固体。它不同于共晶体，在后者的反应中，两种产物只有一种是在其凝固温度之下。

monotropism(单变性) 一种固体以两种或更多种的形式(晶体结构)存在的能力，但是其中一种形式在所有的温度和压力下都是稳定的改进型。铁素体和马氏体作为单向转变的一对存在于奥氏体开始形成的温度之下，例如在钢里。其英文另一种拼写方法为 monotrophism。

morphology(形态) 作为一种材料(中)的晶体、晶粒或颗粒，它们所具有特征性的形状、样式，表面的纹理或轮廓，一般都是以显微镜的尺度而言。

mosaic structure(镶嵌式结构) 晶体中的一种亚组织，其毗邻的区域仅有稍许不同的方向。

mottled cast iron(麻口铸铁) 包含有灰铸铁和白口铸铁两种成分相混合的铸铁，这种材料具有混色斑纹的断口形态。

mounting(镶样) 在制备样件的断面表面时所采用的一种固定金相观察用样件的方法。样件被镶嵌在塑料中或以机械的方法固定于夹紧装置里。

***mounting resin*(镶样树脂)** 用于镶嵌金相样件的热压或热塑树脂。

***Ms* temperature(马氏体开始形成温度)** 对于任何一种合金系统，马氏体在冷却过程中开始形成的温度。见应用于铁合金定义的 *transformation temperature*(*相变温度*)。

mulling(混砂) 将翻砂用的型砂与水及粘土进行混合和搅拌，使之具有适合模铸的性质。

multiaxial stresses(多轴向应力) 有两个或三个主应力不等于零的应力状态。

multiple(锻坯) 从棒料或钢坯上切下一段长度的锻造毛坯，其材料的量正好适合单个工件的用量。

multiple-pass weld(多重焊缝) 用连续的两道或多道的钎料堆焊而成的焊缝。

multiple-slide press(多滑块压力机) 有多个单独滑块的压力机，都装在一个主滑块上或分别连接在由一根主轴驱动的各个偏心轮上，这些滑块均可以调节行程长度及其定时。也见 *slide*(*滑块*)。

multiple spot welding(多点点焊) 在焊机的一个完整的焊接周期里进行多点焊接的点焊。

m*-value** 见 ***strain-rate sensitivity(*应变率敏感度*)。

N

nanohardness test(纳米硬度试验) 一种压痕硬度试验方法，通常依据压痕力对测头尖的移位读数，按照10~1000nm深度的顺序评定表面对于压陷的阻止能力。

native metal(自然金属) (1)由非结合金属构成的

地球外层中的任何沉积。(2)在这种沉积中的金属。

natural aging(自然时效) 过饱和固溶体在室温里的自发时效。也见 *aging(时效)*。比较 *artificial aging(人工时效)*。

natural strain(自然应变) 见 *true strain(实际应变)*。

NDE 见 *nondestructive evaluation(无损评价)*。

NDI 见 *nondestructive inspection(无损检测)*。

NDT 见 *nondestructive testing(无损试验)*。

near-net shape(近净成形) 见 net shape(净成形)。

necking(缩颈) (1)通过单轴拉伸或伸延使材料局部区域的横截面积缩小。(2)圆柱形外壳或管子在部分长度上的直径变小。

necking down(缩颈) 试件截面在拉伸变形的过程中发生局部缩小。

net shape(净成形) 严格符合规定尺寸要求的粉末冶金零件、铸件或锻件的形状。这类零件不需要进行任何二次切削加工或表面精加工。近净成形零件只是大部分而不是全部表面不需要加工，或表面只需少量切削或精加工的零件。

Neumann band(诺埃曼带、诺埃曼层状组织) 铁素体中的机械孪生组织。

neutral flame(中性火焰) (1)一种气体火焰，在其火焰内部既没有过量的燃气也没有氧气。利用周围环境中的氧气完成火焰内部产生的 CO_2 和 H_2 的燃烧。(2)一种氧燃气火焰，其使用部分既无氧化也无还原。也见 *carburizing flame(渗碳火焰)*、*oxidizing flame(氧化火焰)* 和 *reducing flame(还原火焰)*。

neutron embrittlement(中子脆化) 用中子轰击而造成的脆化，在反应堆的核心部分暴露于中子流里的金属常属于这种情况。钢的中子脆化可以从塑性到脆性的相变温度的提高得到证明。

nibbling(步冲轮廓法) 使用快速往复冲制在金属薄板上切割出轮廓来，即进行大量的小步切割。

nip angle(咬入角) 见 *angle of bite(咬入角)*。

nitriding(渗氮) 通过与含氮物质，通常为氨气或熔融的成分适当的氰化物的接触，并保持适当的温度(对于渗碳体钢低于 Ac_1)，使氮渗入固体铁合金的表层。无需淬火就能生成硬化层。也见 *bright nitriding(光亮渗氮)* 和 *liquid nitriding(液体渗氮)*。

nitrocarburizing(氮碳共渗) 指凡是在低于下临界的温度里使氮和碳渗入铁质材料的表层，并通过扩散形成一定浓度梯度的各种工艺。进行氮碳共渗主要是为了产生一种抗胶合的表面层，同时改善其抗疲劳性。比较 *carbonitriding(碳氮共渗)*。

noble(惰性的) 电极电位的正方向，类似的贵重金属如金和铂。

noble metal(惰性金属) (1)具有相对氢电极很高的正向电位的金属。(2)具有明显的耐化学反应，尤其是氧化和与无机酸溶液反应的金属。这个词常与贵重金属(Precious metal)为同义词。

noble potential(惰性电位) 比标准氢电位更阴极的(正的)(原文如此——译者注)的电位。

no-draft(draftless) forging(挤压模锻) 公差极小且余量很少或没有余量的锻件，只需最低限度的切削加工就能生产出成品零件。通过对晶粒流更为严格的控制和在成品零件上保留表层材料，可以使其力学性能得到增强。

nodular graphite(球状石墨) 相对片状石墨(见 *flake graphite(片状石墨)*)而言的石墨成球状(圆形的)。也见 *ductile iron(球墨铸铁)* 和 *spheroidal graphite(球状石墨)*。

nodular iron(球形铁) 见优先选用术语 *ductile iron*(球墨铸铁)。

nominal stress(名义应力) 按照实际横截面计算的一点上的应力，不考虑如孔穴、沟槽、倒角等几何形态缺陷对应力的影响。利用简单的弹性理论进行计算。

nondestructive evaluation(NDE)(无损评价) 从广义上考虑也是 *nondestructive inspection(NDI)(无损检测)* 的同义词。更准确地说，NDI 检测结果的定量分析将决定该材料尽管存在着缺陷，但按其功能要求是否还可以被验收合格。然而借助于 NDE，检测人员可以根据缺陷的大小、形状、类型和所处的部位决定这些瑕疵能否予以接受。损伤许可性设计所依据的原则是保证在瑕疵存在的情况下安全运行。

nondestructive inspection(NDI)(无损检测) 一种用于决定材料、零件或装配的质量或特征的技术或方法，如超声波或 X-射线检查，它不会永久地改变检测对象及其性质。用于既能发现组织内部的异常现象，又不至于降低其性能或影响其使用性。

nondestructive testing(NDT)(无损试验) 从广义上考虑，也是 *nondestructive inspection(NDI)(无损检测)* 的同义词。

nonmetallic inclusions(非金属夹杂物) 见 *inclusion(夹杂物)*。

normal direction(法向) 在经加工材料上与加工平面相垂直的方向。也见 *longitudinal direction(纵向)*

和 *transverse direction*（*横向*）。

normalizing（正火）　将铁质合金加热至高于相变温度范围的适当温度，然后在空气中冷却到明显低于相变温度范围的温度里。

normal segregation（正偏析）　在铸件最后凝固部分中的低熔点合金组分的聚集。比较 *inverse segregation*（*反偏析*）。

normal solution（当量溶液）　在1L的溶液中含有一克当量的活性试剂的水溶液。

normal stress（法向应力）　与力的作用平面相垂直的应力分量。法向应力可以为拉应力或压应力。

nose radius（刀尖半径）　刀具切削刃上圆弧部分的半径。

notch acuity（缺口锐利度）　这与由一定缺口特定结构所产生的应力集中的严重程度有关。如果缺口的深度与缺口最窄截面处的宽度（或直径）相比较非常小，则缺口的锐利度可以用缺口的深度与其底部的半径之比表示。反之，则定义为缺口最窄截面处的宽度（或直径）的一半与其底部的半径之比。

notch brittlement（缺口脆化）　材料在应力集中处的脆性断裂的敏感度。例如在缺口拉伸试验中，如果缺口的强度低于未经开槽的试件的抗拉强度，则可认为材料属于缺口脆化。反之，则可认为具有缺口塑性。

notch depth（缺口深度）　即从试验样件的表面至缺口底的距离，在一圆柱形的试件中，则为通过车削切除的环形沟槽面积占原始横截面积的百分比。

notch ductile（缺口塑性）　缺口试件的拉伸试验中，金属被完全拉断后的面积缩颈百分比。

notched specimen（缺口试件）　一种特意刻出缺口的试验样件，通常刻成V形，以此引发失效并确定失效点的位置。

notch factor（缺口系数）　普通试件测出的冲击韧度与刻有缺口的试件测出的冲击韧度之比。

notching（刻缺口）　从带钢、毛坯或零件的边缘上，刻出不同形状的缺口。

notching press（缺口冲床）　一种机械式冲床，用于在内或外圆周上的冲制缺口，也可以沿直线冲制缺口。因为这种冲床一次行程只能冲一个缺口，故配有自动进料机构。

notch rupture strength（缺口断裂强度）　用缺口试件作应力断裂试验时，作用载荷与最小截面的原始截面积之比。

notch sensitivity（缺口敏感度）　材料因为如缺口、横截面的突变、裂纹或划痕而引起应力集中，材料由此对发生断裂的敏感度增加的程度就称为缺口敏感度。低缺口敏感度通常与塑性材料相关，而高缺口敏感度通常与脆性材料相关。

notch strength（缺口强度）　作用于拉伸试验的试件上的最大载荷除以最小横截面积（即在缺口根处的截面积）。也称为缺口抗拉强度。

nuclear grade（核级材料）　性能适用于原子核用途上的材料。

nucleation（成核）　在疏松的部位萌生相转变，这时新相在其核心处生长。也见 *nucleus*（2）（*晶核*）。

nucleus　（1）（**原子核**）。一个原子的中心重核，大部分的质量和总正电荷都集中在其上面。（2）（**晶核**）。第一组织稳定的颗粒，能够起动一种相的重结晶或者一种新相的生长，还能拥有与其金属母体的界面。也指能起同样作用的外来颗粒。

nugget　（1）（**金属块**）。在自然界发现的游离小块贵重金属，如金或银。（2）（**熔核**）。在焊点、焊缝或焊堆中的焊接金属。

***n*-value（*n*-值）**　见 *strain-hardening exponent*（*应变硬化指数*）。

O

offhand grinding（自由磨削）　人工以手动方式将砂轮压住工件进行的磨削，或用工件压住砂轮进行的磨削。它也常指随意操作砂轮机或工件，以此获得所需要的结果。尺寸和公差往往也不作规定，或规定得很粗略；操作工主要靠目视检验决定应当磨去多少。对照 *precision grinding*（*精密磨削*）。

offset（偏移法）　应力-应变曲线的起始部分与一条它的平行线之间沿应变坐标轴上的距离（一般为0.2%），将该平行线在应力-应变曲线上的交点所取的应力值确定为屈服强度。此法用于为一些屈服点不甚明显的材料确定屈服强度值。

offset yield strength（条件屈服强度）　当应变超过应力-应变曲线上初始的、近似线性正比部分延伸到一个规定的数值（偏移量）时的应力。它用单位面积的力表示。

oil canning（凹坑变形）。见 *canning*（*凹坑变形*）。

oil quench（油淬）　在油浴里使碳素钢硬化。

Olsen ductility test（奥尔森塑性试验）　一种杯冲试验，将薄钢板试件除了中间以外的周围都予以固紧，然后用一个标准钢球使其变形直至发生破裂。这时杯形的高度就作为塑性的测量值。

open-back inclinable press（后开式可倾冲床）　一种立式的曲柄冲床，它可以倾斜，使床身有一个从

0°到30°的可变倾斜范围。成形后的零件从后面的开口滑出。常常也称之为OBI冲床。

open-die forging(开式模锻造) 一种在平板模和成形模之间进行的金属热机械成形，金属在里面的流动并不完全受限制。也如手工锻打或史密斯锻。见 *hand forging(smith forging)(手工锻打)*。

open dies(开式模具) 平表面的模具，用于毛坯的预成形和生产手工锻件。

open hearth furnace(平炉) 一种浅炉膛和低炉顶的反射型熔化炉。火焰经由炉膛里的炉料，同时以直接火焰和从炉顶和侧壁辐射的两种方式加热炉料。也见 *reverberatory furnace*(反射炉)。

open rod press(开式立柱压力机) 一种液压压力机，其滑块由垂直的圆立柱(通常为四根)导向，其立柱还同时为横梁和床身支承到位。

optical emission spectroscopy(光学发射光谱学) 一种在电磁波谱的波长区里处于近紫外光、可见光和近红外光中的发射光谱技术。也见 *electromagnetic radiation (电磁辐射)*。

orange peel(橘皮表面) 一种像卵石粒状的粗糙表面，当一种具有不寻常粗糙晶粒大小的金属承受超过其弹性极限的应力时，就会产生这种形状的表面。也叫卵石表面和鳄鱼皮状表面。

orbital forging(轨道锻) 见 *rotary forging (摆动碾压)*。

ordered structure(有序结构) 一种固溶体的晶体结构，其不同元素的原子都寻求合适的晶格位置。对照 *disordered structure (无序结构)*。

ore(矿石) 一种天然矿石，根据其商业价值进行开采和提取其成分、金属或其他有关处理。

ore dressing(选矿) 同 *mineral dressing (选矿)*。

orientation(晶格方位) 晶格轴线在其选定的参照坐标系里的空间位置。也见 *preferred orientation (择优取向)*。

original crack size(α_o)(初始裂纹尺寸) 试验开始时的实际裂纹尺寸。

oscillating die press(摆动模平锻机床) 一种小型的高速金属成形机床，其下模和冲头在一个工作冲程中随其带料作水平运动，通过一次往复运动后回到起始位置再开始下一个冲程。

overaging(过度时效) 在超出所要求的时间和温度的条件下进行的时效处理，以此获得某种性能的最大改变，甚至使原来的性能发生根本性的变化。

overbending(矫枉过正) 将金属弯曲的弧度超过成品零件所要求的程度，以便使其在弹回后得到补偿。

overdraft(轧件上弯) 轧制时由于下辊的速度以上辊的高，故当轧件从轧辊中出来时会向上弯曲。

overhead-drive press(顶置式驱动压力机) 一种机械式压力机，其驱动机构安置在横梁或立柱上部零件的里面或上面。

overheating(过热) 将金属或合金加热至使其性能受到影响的温度。当原来的性能无法通过进一步的热处理、机械加工或加工和热处理相结合的方法予以恢复时，这种过热就称之为烧伤。

overlap(焊瘤) 在电阻缝焊中因过度焊接而形成的有一定重熔焊接的区域。

oversize powder(筛上粉末) 粉末颗粒的尺寸大于技术指标所规定的最大值。

overstressing(应力超限) 疲劳试验在高于试验最终所用的应力水平上进行循环。

oxidation(氧化) (1)一种因失去电子而使化学价增加的化学反应。对照 *reduction (还原)*。(2)一种腐蚀反应，通过金属的腐蚀生成氧化物，一般指与含有氧元素的气体，如空气所发生的反应。提高温度会加快氧化的速度。(3)使一种物质变为另一种与氧化合的物质的化学反应。保温和熔化炉的许多熔渣都是由炉里所装的合金被氧化而生成的。

oxidation losses(氧化损失) 金属或合金由于氧化而造成数量上的消耗。

oxidative wear(氧化磨损) (1)一种与氧发生化学反应或者由氧化环境起主要作用的腐蚀磨损过程。(2)由两个金属零件之间的相对滑动而造成的一种磨损，并因此在金属表面生成氧化膜。这种氧化膜可以防止在两个滑移表面间形成金属粘结，从而使磨损颗粒细化，并降低磨损速率。

oxidized steel surface(钢的氧化表面) 表面具有薄薄的能牢固粘附的氧化表层(呈草黄至蓝颜色)，并且从卷材或薄板的边缘向里面延伸。

oxidizing agent(氧化剂) 能产生氧化，并使自身被还原的化合物。

oxidizing atmosphere(氧化气氛) 因氧的过度进入而使其里面的材料更易被氧化的一种炉内的气氛。

oxidizing flame(氧化火焰) 在内焰有过量氧气而生成一种火焰，它具有氧化效应。见 *neutral flame (中性火焰)* 和 *reducing flame (还原火焰)*。

oxyacetylene cutting(氧乙炔切割) 一种氧燃气体的切割工艺，作为燃料的气体为乙炔。

oxyacetylene welding(氧乙炔焊) 一种氧燃气体的焊接工艺，作为燃料的气体为乙炔。

oxyfuel gas cutting(氧燃气体切割) 利用热基体金属与细氧气流之间发生的化学反应切割金属的一类工艺。通过特定燃料气体，如乙炔、氢气、天然气、丙烷、丙烯或MAPP气体(一种稳定的甲基乙炔-丙二烯)的燃烧来保持金属所必需的温度。

oxyfuel gas welding(氧燃气体焊接,OFW) 通过燃烧特定燃料气体如乙炔、氢气、天然气或丙烷所形成的火焰加热金属，使它们熔化在一起的一类工艺。其过程中是否用压力将它们连接在一起可视情况而定，而且是否加入任何钎料也可视情况而定。

oxygas cutting(氧气切割) 见优先选用术语 *oxygen cutting(氧切割)*。

oxygen arc cutting(氧弧切割) 一种利用氧气与基体金属在高温下的化学反应切割金属的氧切割工艺。所需温度是由可熔的电极与基体金属之间的电弧来保持的。

oxygen cutting(氧切割) 指所有利用氧气与基体金属之间在高温下发生的化学反应切割金属的工艺。使用化学助熔剂或金属粉末可让抗氧化的金属更容易进行反应。也见 *chemical flux cutting(化学助熔切割)*、*metal powder cutting(金属粉末切割)*、*oxyfuel gas cutting(氧燃气体切割)*、*oxygen arc cutting(氧弧切割)*和 *oxygen lance cutting(氧枪切割)*。

oxygen-free copper(无氧铜) 一种不含氧化亚铜的电解铜，生产时不使用残余金属或非金属的脱氧剂。

Oxygen gouging(氧刨) 通过氧切割形成一个坡口或沟槽。

oxygen lance(氧枪,吹氧管) 一定长度的管子，用于将氧气从炼钢炉里钢液的下面或上面送入炉内，或者在氧气吹管切割过程中将氧气送至切割点。

oxygen lance cutting(氧枪切割) 一种用于切割金属的氧切割工艺，通过自耗喷管送入氧气；并用别的方法进行开始切割时的预热。

oxygen probe(氧探头) 一种气氛监测装置，它用电子原理测量炉内氧气或炉子供气的分压与外部大气压之间的差值。

P

pack carburizing(固体渗碳,装箱渗碳) 钢的一种表面硬化方法，将零件与渗碳化合物一起装入钢制的箱里，并加热至高温。这种方法已多被气体和液体渗碳工艺所取代。

pack nitriding(固体渗氮,装箱渗氮) 钢的一种表面硬化方法，将零件与氮化物一起装入钢制的箱里，并加热至高温。

pack rolling(叠轧) 将两张或更多张的金属薄板叠在一起进行热轧，其氧化皮能防止它们彼此粘焊在一起。

pancake forging(扁平锻造) 一种形状通常为扁形的粗锻，能以少量的工装快速锻成。一般要经过相当多的切削加工才能达到成品尺寸。

pancake grain structure(扁平晶粒结构) 一种金属结构，其单个晶粒的长度和宽度比起厚度要大得多。

paramagnetic material(顺磁材料) (1)一种磁导率大于1而且实际上与磁化力无关的材料。(2)由于带有作用磁场的永久性原子磁矩及电子磁矩的相互作用和自行排齐，从而成为一种有较小正磁化率的材料。比较 *ferromagnetic material(铁磁材料)*。

paramagnetism(顺磁性) 物质所显示的一种性质，当将其置于磁场里时，会被沿与磁场相平行的方向磁化，其磁化的程度与磁场成正比(除非在非常低的温度里或极大的磁场里)。比较 *ferromagnetism(铁磁性)*相比。

Parkes process(帕克斯炼铅法) 一种从铅中回收贵重金属的方法，其原理是如果将 $w(Zn)$ 为 1% ~ 2% 的锌搅拌进熔化的铅里，则锌与金、银的复合物就被可以分离并提炼出来。

partial annealing(不完全退火) 不太确切的术语，用于表示对经过冷压加工的金属材料的一种处理，使其强度降低到一定的水平上或起到消除应力的作用。为合理起见，材料的种类、冷变形加工的程度以及时间-温度规范必须要有所规定。

particle shape(颗粒形状) 金属颗粒的形态，如球状、圆形、多角形、针形、枝状、不规则形、疏松状、碎块状、块状、杆状、片状、团状或板状。

particle size(颗粒尺寸) 单个颗粒通过屏幕分析或其他适用的仪器所测定的特定方位上的直线度尺寸。也见 *sieve analysis(过筛分析法)*和 *sieve classification(过筛分级法)*。

particle size distribution(颗粒尺寸分布) 相对于过筛号数或颗粒大小进行分级的粉末或砂子样品在其各分级中所占的质量或数量百分比。

particle sizing(颗粒尺寸分级) 颗粒材料在规定的颗粒大小范围中的分布。

parting (1)(**分金**)。在贵重金属的回收中，将银从金里分离出来。(2)(**分型线/面**)。在砂型铸造中，砂型或型箱的上、下型之间的分隔区域。(3)(**脱

模剂)。为便于将模型从砂型中取出,有时候在砂型上使用的一种制剂。(4)(**分割线**)。同时进行切割沿两条平行线或两条在侧向相互对称的线。(5)(**联冲**)。一种冲剪工序,用于以一次冲压生产两个或多个零件。

parting compound(分型剂) 一种涂敷或喷洒在翻砂(铸造)模型表面的材料,以此防止型砂粘附在模型上面,并且当上型箱相对于下型箱起吊时,两者的分型面也容易分开。

parting line(分型线) (1)铸件或塑料模的分型面接缝,或具有模腔或型腔的锻模之间的分型面。(2)铸件、塑料零件或锻件表面上的凸线或披缝,即常说的接缝。

parting plane(分型面) (1)锻造中锻模间的分界线。(2)铸造中铸型间的分界线。

parting sand(分型砂) 在造型中,用于抹撒在砂型表面将其分隔的一种细砂。

pass(通过) (1)金属从轧辊基座的一次传递。(2)轧制金属的两个槽辊之间让金属通过的开档。(3)沿着焊缝轴线熔敷的焊接金属。也见 *weld pass(焊缝路径)*。

passivation(钝化) (1)包含在腐蚀中的电极阳极反应速度被减缓。(2)金属由于腐蚀而变得缺少活性的过程。(3)金属的化学活性表面变成很没有反应性的状态。对照 *activation(活性)*。

passive(钝态的) (1)被表面反应生成物所控制的一种金属腐蚀。(2)在对金属有强烈氧化作用的位势区域里具有以低腐蚀率为特征的金属表面状态。

passive-active cell(钝化活化电解槽) 一种腐蚀电解槽,在里面作为其阳极的金属处于活性状态,而作为阴极的同种金属却处于非活性状态。

passivity(钝化性) 一块金属由于表面有着氧化物或其他化合物的不可渗透覆盖层,从而具有比处于活性状态时的金属更强的正电位的一种状态。

patenting(钢丝的韧化处理) 在线材拉制之前或其过程中间应用于中高碳钢的一种热处理。其过程包括先将其加热到相转变以上的温度,然后在空气中或熔化的铅浴或盐浴里冷却到 Ae_1 温度以下。

patent leveling(延压平整) 同 *stretcher leveling(拉伸矫平)*。

patina(铜绿) 如铜和铜合金的一些金属表面由于暴露在空气里而生成的一种覆盖层,一般为绿色。也用于描述任何金属表面经风化后的外观。

pattern(模型) (1)用木头、金属或其他材料制成的一种型式,再将造型材料敷围在其周围,形成可用于浇铸金属的型腔。(2)一种用蜡或塑料制成的型式,再将耐熔材料敷围在其周围,形成可用于浇铸金属的型腔。(3)零件的全尺寸复制品,用于在切削加工中仿形。

pearlite(珠光体) 一种亚稳定型的铁素体和渗碳体的层状聚集物,由奥氏体在高于贝氏体温度的范围转变而成。

pearlitic malleable(珠光体可锻铸铁) 见 *malleable iron(可锻铸铁)*。

pearlitic structure(珠光体组织) 类似于钢中的珠光体组分的显微组织。因此,它是一种具有不同粗糙程度的层状组织。

peeling(脱皮) 由于粘附力的不足,一种涂敷层从另一种涂敷层或基体上脱落下来。

peel test(剥离试验) 一种破坏性的检验方法,搭接的接缝被机械地剥离下来。

peening(锤击) 利用锤头打击或喷丸冲击对金属进行机械加工。

penetrant(渗透剂) 一种表面张力低的液体,用于液体渗透剂检验,它能流入被检验零件的表面裂缝中。

penetrant inspection(渗透检测) 见优先选用术语 *liquid penetrant inspection(液体渗透剂检测)*。

penetration (1)(**粘砂**)。在翻砂中,由于金属流进沙粒间的空穴而造成的铸件表面瑕疵,通常称 *metal penetration(金属粘砂)*。(2)(**焊接熔深**)。在焊接中,从基体的原始表面至熔透到的那一点之间的距离。

penetration hardness(压入硬度) 同 *indentation hardness(压痕硬度)*。

percussion welding(冲击焊) 一种电阻焊工艺,利用电能的快速放电形成的电弧所产生的热量使对接表面连接在一起。在放电的过程中或之后,立即施以撞击压力。

perforating(多孔冲) 同时冲制多个孔,通常在薄板、工件毛坯或已经成形的零件上按照一定的、有规则的形式进行冲制。所冲制的孔一般都是圆形的,但可以为任意形状。该工序也叫多孔冲压。也见 *piercing(开孔)*。

peripheral milling(圆周铣削) 铣削与其铣刀轴线相平行的表面。

peritectoid(包晶) 一种等温可逆反应,在冷却过程中,一种固相与第二种固相发生反应,并在冷却中生成单一的(且不同的)固相。

permanent magnet material(永磁材料) 一种能被永

久性磁化的铁磁合金，因为它具有外加磁场撤销后仍保持所感应的磁性和磁极的能力，是一种具有高矫顽磁力的合金。其名称还因为早期的永磁体性质与它们的硬度有关。

permanent mold（金属模） 两个或多个零件的金属、石墨或陶瓷的铸模（而不是锭模），它能重复使用生产许多相同形状的铸件。金属液体通常以重力浇注。

permanent set（永久变形） 一个试件在规定时间里承受预定大小的拉伸、压缩或剪切的载荷，然后经过规定的时间予以消除后，所保留的变形。在蠕变试验中，则是在造成变形的载荷被撤销后的一个相当长的规定时间内还存在着不可恢复的残余变形。还有，其长度上的增加表示成原始长度的百分比，弹性材料只要在一段标准时间内承受着能达到上述变形的载荷，就不能再恢复到其原始长度。

permeability （1）（**渗透性**）。未经物理或化学作用，气体、蒸汽、液体或固体从一种（往往是疏松的）材料里的通过或扩散（或指其通过的速率），作为一种流体流经材料的度量。（2）（**磁导率**）。用于表示磁感应与磁化力之间各种关系的一般性使用术语。这些关系就是“绝对磁导率”，即磁感应的变化除以相应的磁化力的变化；或“特殊（相对）磁导率”，即其绝对磁导率与自由空间的磁导率之比。（3）（**透气性**）。在金属铸造中，铸型材料的一种特性，即气体从这些材料里通过的能力。“透气指数”可通过标准试验得到。

pewter（锡基合金、白镴） 一种含有锑和铜的锡基白金属。原来，它被定义为一种锡和铅合金，但是为防止毒性和失去光泽，现在已不再含有铅了。现在的成分里含有 $w(\mathrm{Sb})$ 为 1%～8% 的锑和 $w(\mathrm{Cu})$ 为 3% 的铜。

pH（pH 值） 氢离子活动性的负对数，它用于表达一种溶液的酸度或碱度。在 25℃（77℉）下，7.0 定为中性，在 7.0 以下减少，表示酸性增加；在 7.0 以上增加，表示碱性增加。pH 值的范围是从 0 到 14。

phase（相） 材料系统中具有物理同质和独特征状的部分。

phase change（相变） 从一种物理状态到另一种状态的转变，例如从气相变为液相，液体变为固体，气体变为固体，或反之亦然。

phase diagram（相图） 表示在特定的加热和冷却条件下的一种合金或陶瓷系统里，对应其相区的温度极限和成分极限的图解。相图可以是平衡图、近似平衡图，或者亚平衡状态或相的表征。与组分图（Con stitution diagram）是同义词。比较 *equilibrium diagram（平衡图）*。

phase rule（相律） 达到平衡的可以共处的最多相数（P）等于 2 加上混合中的组分数（C），再减去自由度数（F），即：$P+F=C+2$。

phosphating（磷酸盐处理） 通过将金属在磷酸盐水溶液中浸没，使其表面生成一种粘附的磷酸盐镀层。也称为磷化。也见 *conversion coating（转换涂层）*。

phosphorized copper（磷化铜） 一般用于指经过用磷还原的铜。最常用的是还原铜。

photoelasticity（光弹性） 测量应力的大小和分布的一种光学方法，利用零件的透明模型，或将一层光弹材料的薄膜粘贴在真实零件的表面上。

photomacrograph（宏观照相术） 用照相的方法得到的宏观照片。

photomicrograph（微观照相术） 用照相的方法得到的微观照片。

physical crack size（a_p）（实际裂纹大小） 在断裂力学里，它指从参照平面到观察到的裂纹前沿的距离。这个距离代表沿裂纹前沿的若干次测量值的平均。参照平面取决于试件的样式，并且在正常情况下将它取为边界面或包含有载荷线、试件或中厚板的中心线的平面。

physical metallurgy（物理冶金学） 是一门涉及金属与合金的性质，及其成分、工艺和环境对这些性质的影响的科学和技术。

physical properties（物理性能） 材料所具有的对于其组织相对不敏感的性质，而且这些性质不用施加作用力就能够予以测试，例如密度、电导率、热膨胀系数、磁导率和晶格参数。但是并不包括化学反应性。比较 *mechanical properties（力学性能）*。

physical testing（物理试验） 用于测定材料物理性能的全部范围的方法。除了密度以及热学、电学和磁学性能以外，物理试验还可用于检测一些简单的基础性的物理性能，如颜色、晶体形态和熔点。

physical vapor deposition（物理气相沉积，PVD） 沉积物以原子或分子的形式逐个转移和沉积的一种镀膜工艺。最为通用的 PVD 方法就是溅射和蒸发。作为 PVD 的主要工艺，溅射就是利用高电压得到的加速气体离子将材料从其源极（靶）转移到基体上。蒸发是最早使用的 PVD 工艺，其利用的物理方法主要是蒸发实现材料的转移并形成镀膜。物理气相沉积镀膜应用于提高切削刀具的摩擦、磨损和

硬度的性能，还能用作抗腐蚀的镀膜。

pickle liquor(酸洗液) 酸洗废液。

pickle stain(酸洗污渍) 由于化学清洗中没有进行合适的清洗和干燥，而造成金属表面出现污渍斑痕。

pickling(酸洗) 通过浸入酸性的水溶液里，以化学的方法清除铁和钢表面氧化物(氧化皮)以及其他杂质，如尘土。最普通的酸洗溶液为硫酸和盐酸。

pickoff(自动落料装置) 工件经过冲压脱模后，自动将其从冲压模上移去的装置。

pickup (1)(**送料机构**)。在压制成形工序里的金属输送装置，由工装到零件或由零件到工装。(2)(**粘附颗粒**)。粘附在轧制件表面的金属氧化物小颗粒。

Pidgeon process(皮江法提镁工艺) 一种用硅铁还原氧化镁生产镁的工艺。

piercing(开孔) 切割槽孔(剪切或冲孔)的一般性使用术语，例如在薄板、中厚板或零件上的孔和槽。这种工序类似于冲切(blanking)，两者的差别在于由 piercing(开孔)产生的落料或冲料是废料，而由 blanking(冲切)产生的坯料却是有用的零件。

piezoelectric effect(压电效应) 由某些晶体材料所表现的一种在弹性应变与电场之间的可逆性相互作用。其应变方向取决于电场的极性，反之亦然。比较 *electrostrictive effect*(电致伸缩效应)。

pig(金属铸块) 一种用于重熔的金属铸件。

pig iron(生铁) (1)利用铁矿石在高炉里的还原，以此生产高碳铁。(2)铸块形式的铸铁。

Pilger tube-reducing process(皮尔格管材减径工艺) 见 *tube reducing(管材减径)*。

pin(for bend testing)(弯曲试验用导杆) 指半导向弯曲试验、导向弯曲试验或卷绕弯曲试验中，所使用的在弯曲内表面施加弯曲力的绕杆或工具。在自由弯曲或半导向弯曲至180°的过程中，有一种厚度适当的隔板或隔块，当弯曲完成时被夹在试件弯头的中间，因此也可以将其称为导杆或芯棒。也见 *mandrel(心轴)*。

pinchers(皱褶) 金属薄板或带钢在轧制过程中形成的表面皱纹缺陷，它一般是沿与轧制成斜角的方向，并呈蕨叶状的波纹。

pinch pass(冷精轧) 金属薄板通过轧辊的匝道，使其在厚度上形成非常小的压缩。

pinch trimming(挤压平整) 将管形或壳形零件的边缘或凸缘推挤或压挤通过固定凸模或拉伸凸模的刃口，以此对其边缘进行平整。

pin expansion test(销扩试验) 试验借助锥销用力扩大管子的开口端，以此测试管子接受扩张的能力、或检验其是否存在裂纹或其他纵向脆裂。

pinhole porosity(细缩孔疏松) 其疏松是由遍布整个金属的无数细小气孔(细缩孔)造成的，常常可以在焊接金属、铸件和电解沉积里发现。

Piobert lines(皮奥伯特线) 见 *Lüders lines(吕德斯线)*。

pipe (1)(**缩管**)。特别是钢锭在凝固的过程中因为收缩而形成中心缩孔。(2)(**缩孔**)。因为孔穴而造成的锻造或铸造产品上的瑕疵。(3)(**管线**)。管状的金属产品，铸造或锻造而成。也见 *extrusion pipe(挤压缩管)*。

pipe tap(管螺纹丝锥) 用于攻制管接头或孔的内管螺纹的丝锥。

pipe thread(管螺纹) 内或外的机制螺纹，通常都是带锥度的，用于在管道系统里带压力的紧密机械连接。

pit(浸蚀麻点) 在材料表面上出现的规则或不规则的小凹坑，是由于暴露在例如腐蚀、磨损或周期性受热的环境里而产生的。也见 *pitting(点蚀)*。

pitting(点蚀) (1)因为腐蚀、磨损或其他由机械促成的剥蚀而在表面形成的轮廓清晰的小凹坑。(2)金属表面的局部性腐蚀，形成孔穴的形式局限在一个点或微小的区域里，而且呈现为一种凹坑的形式。

plane strain(平面应变) 属于线性弹性断裂力学的应力状态，在与拉应力方向以及裂纹生长的方向(即平行于裂纹的前沿)都相垂直的方向上的应变为零，这最有可能的原因是厚板材在沿着与之表面相平行的方向上承受载荷。在平面应变条件下，断裂不稳定性平面垂直于主拉应力方向。

plane-strain fracture toughness(K_{Ic})(平面应变断裂韧度) 在裂纹尖端平面应变条件下的裂纹延伸阻力。也见 *stress-intensity factor(应力强度因数)*。

plane stress(平面应力) 是线性弹性断裂力学的应力状态，它在厚度方向上的应力为零，这最有可能的原因是非常薄的薄板在沿着与之表面相平行的方向上承受载荷。在平面应力条件下，断裂不稳定性平面相对于主拉应力方向倾斜45°。

plane-stress fracture toughness(K_c)(平面应力断裂韧度) 根据线弹性断裂力学，在不稳定状态下的裂纹延伸阻力值是由试件的R-曲线和临界裂纹延伸力曲线之间的切点求出。也见 *stress-intensity factor(应力强度因数)*。

planimetric method(平面测量法) 一种测量晶粒大

小的方法，晶粒在规定的大小范围内计数。

planing(刨) 通过工件及其安装的工作台相对于静止的单刀尖切削刀具作往复直线运动，以此进行平表面的加工。

planishing(锤平) 通过用高抛光模或专门为此所设计的锤头对金属进行快速连续的锤打，或者在平整轧机上进行辊压，以此得到低表面粗糙度的金属表面。

plasma arc cutting(等离子电弧切割) 一种电弧切割工艺，利用被收缩的电弧所产生的热量使金属局部熔化，然后通过等离子炬喷发出热的、离子化气体的高速喷射将熔化金属吹走，以此将金属切割开来。

plasma arc welding(等离子电弧焊,PAW) 一种电弧焊工艺，它利用在电极与工件(传递电弧)或电极与收缩喷嘴(非传递电弧)之间形成的被收缩的电弧，加热需连接的金属，使其结合在一起。从一个小孔喷射出来的离子化热气体将围绕在电极的四周形成保护，而且还能从一种辅助的保护气源得到补充，这种保护气可以是惰性气体或一种混合气体。焊接时是否使用压力和提供钎料可视情况而定。

plasma-assisted chemical vapor deposition(等离子辅助化学气相沉积) 一种利用低压辉光放电等离子促成其反应的化学气相沉积。也称为等离子强化化学沉积。

plasma carburizing(等离子渗碳) 同 *ion carburizing (离子渗碳)*。

plasma nitriding(等离子氮化) 同 *ion nitriding (离子氮化)*。

plasma spraying(等离子溅射) 一种利用等离子炬的非传递电弧所形成的气体等离子，并以此作为熔化的热源促使表面金属渗入基体的热溅射工艺。

plaster molding(石膏铸型法) 一种制作铸型的技术，用石膏粘结的团粒粉末调制成水浆状，将其倒入模型周围，使其硬化，待取出模型后再彻底干燥。这种技术应用于制造尺寸精确、表面光滑的非铁铸件。

plastic deformation(塑性变形) 材料在应力的作用下发生的永久(非弹性)变形，也就是使材料产生超过其弹性极限的变形。

plastic flow(塑性流动) 材料能够永久性地延伸或压缩而不发生断裂的现象。

plasticity(塑性) 材料的一种性质，当材料在足以使其发生变形的力的作用下反复变形时，不至于断裂，且在作用力撤销之后还能继续保持其形状。

plastic-strain ratio(*r*-value)(塑性-应变比,*r*-数值) 材料的成形性试验，即在薄板拉伸试验中，宽度上的实际应变与厚度上的实际应变的比值，$r=\varepsilon_w\varepsilon_t$(原文如此,似应为 $r=\varepsilon_w/\varepsilon_t$—译者注)。这是一个与拉伸有关的成形性参数，也就是所谓的各向异性的性质。高 *r*-数值表示材料具有很好的拉伸性能。

plate(中厚板) 一种平轧的金属产品，其最小厚度和宽度人为地取决于金属的种类。普通的中厚板厚度介于 6～300mm(0.25～12in)，宽度为 200～2000mm(8～80in)。

plate martensite(片状马氏体) 在 w(C)大约超过 0.5%的钢中可部分形成的马氏体和在 w(C)大约超过 1.0%的钢中全部形成的马氏体。马氏体呈现为两面微凸的片状(晶体)。

platen (1)(**滑块**)。金属成形压力机的滑动部件、滑块或压头。(2)(**台面**)。电阻焊、试验机或其他机械设备上带有平表面的零件，用于固定、安装模具、夹具或电极卡头，并让其传递压力或力。

plating(镀层) 在物体的金属表面形成的一种粘附层，工厂里常称其为电镀。也见 *electrodeposition (电沉积)* 和 *electroless plating (无电镀层)*。

plating rack(镀架) 用于在电镀时夹持工件和传导电流的工装夹具。

plug (1)(**芯杆或心轴**)。用于压入钻套。(2)(**芯杆或心轴**)。当用于拉过模具时，需将其插入管子。(3)(**冲头或心轴**)。用于拉制杯形工件。(4)(**模芯**)。下模型腔里的凸出部分，以此形成锻件中相应的凹腔。(5)(**活底**)。下模中的活底。

plug tap(塞状丝锥、中号丝锥) 一种丝锥，其头部倒角延伸 3～4 个螺距长度。

plug weld(塞焊) 在焊接的一个零件上的一个圆孔里焊成的焊缝，以此将它与另一焊接件熔合在一起。

plumbage(石墨粉) 特种石墨粉用于涂在模具型腔表面，也可以与粘土混合用于制造坩埚。

plunge grinding(切入式磨削、横向仅给磨削) 一种砂轮仅有的相对运动为沿径向进入工件的磨削。

plus mesh(正筛) 粉末样品留在规定大小的筛面之上，以过筛的筛号作为粉末样品标号。也见 *sieve analysis (过筛分析法)* 和 *sieve classification (过筛分级法)*。

plus sieve(筛上) 粉末样品过筛后留在规定号数的标准筛面上的那部分颗粒状物质(例如金属粉末)。对照 *minus sieve (筛下)*。也见 *sieve analysis (过筛*

分析法）和 *sieve classification*（*过筛分级法*）。

plymetal（涂金属层板） 涂有不同金属粘结层的金属薄板。

P/M *powder metallurgy*（*粉末冶金*）的缩写。

pneumatic press（气动压机） 使用空气或气体将压力传递给上、下锤头的压力机。

point angle（刀尖角度） 一般情况下是指切削刀具的刀尖上的角度。最常见的如麻花钻的顶角，作为一般性用途都取118°。

Poisson's ratio（ν）（泊松比、横向变形系数） 在材料的比例极限以内，由均匀分布的轴向应力引起的横向应变与相应的轴向应变之比的绝对值。

polarity（welding）（极性焊接） 见 *direct current electrode negative*（*直流负极焊，DCEN*）和 *direct current electrode positive*（*直流正极焊，DCEP*）。

polarization（极化） （1）因为电流的通过而造成开环电极电位的改变。（2）在电解过程中电极电位的改变，比较其各自的可逆电位，阳极电位变得更为惰性而阴极更为活性，并常常伴随着在电极表面形成镀膜。

polarization curve（极化曲线） 一个特定电极-电解组合里的电流密度对电极电位的曲线图。

pole（极） （1）利用立体图形所表示晶体平面的法向方向定义晶体平面方位的一种方法。例如用北极定义为其赤道平面。（2）永久磁铁或电磁铁的绝大部分感应线进入或出来的区域。

pole figure（极像图） 多晶团的立体投影所显示的以试件的轴线作为参考轴线的特定晶体平面的极或平面法线的分布。极像图用于表征多晶材料里的主方向。

polishing （1）（**抛光**）。用抹有细微研磨剂的布或研具涂擦金属的表面，使之光滑并具有很高的光亮度。形成某种表面金属的显微流动，实际上还有少量表面金属的去除。（2）（**研磨**）。利用由柔性支承物通常为布轮或经涂层的砂带所携带的磨料颗粒对工件进行打磨，并去除材料。（3）（**金相样品的抛光**）。利用机械的、化学的、电解的或它们组合的工艺制备光滑、能反光的表面，因为在上面没有遗留由于前期切断或磨削所造成的加工痕迹或破坏，所以适合对其进行显微组织的检测。也见 *electrolytic polishing*（*电解抛光*）和 *electropolishing*（*电抛光*）。

polycrystalline（多晶的） 属于一种由许多晶体或微晶体紧密粘结而构成的固体。它可以是同质的（一种物质），也可以是非同质的（两种或多种的晶体型或成分）。

polymorphism（同质多晶型现象） 一般指一种固体具有以一种以上的形态而存在的能力。作为金属、合金及类似的物质，它意味着能以两种或多种的晶体组织而存在，或以一种非晶体形态加上至少一种晶体组织而存在。也见 *allotropy*（*同素异形*）、*enantiotropy*（*互变性*）和 *monotropism*（*单变性*）。

pop-off（暴脱的搪瓷块） 在搪瓷涂层上的小块脱落。通常是由于在烧烤的过程中，氢气或其他气体从基体通过搪瓷涂层向外冒出而造成的，基体表面的氧化物颗粒或其他碎屑也有可能产生暴脱的搪瓷块。通常，这种浸蚀麻点很小并呈锥体形，一旦暴脱的搪瓷块是由严重的鳞状脱皮所造成的，其麻点就会大得多且形状也不规则得多。

porcelain enamel（搪瓷） 一种在425℃（800℉）以上的温度下熔化，并粘结在金属上的琉态或玻璃质的坚实无机涂层（硼硅玻璃）。搪瓷主要应用于薄铁板、薄钢板、铸铁、铝或涂铝的钢上。

pore（微孔） （1）存在于固结的实心块体或烧结块里面的小口、孔穴、缝隙或凹槽，通常大于原子或分子的尺度。（2）粉末冶金压块中的微小孔穴，有时是有意加进去的。（3）在电镀层中的微小穿孔。

porosity（孔隙度） （1）固体中的细小孔洞或疏松，这些空隙的数量表示为占固体总体积的百分比。（2）在焊接件的凝固过程中，因为气体截留在里面所造成孔穴状的瑕疵。（3）铸铁里由于空气截留或收缩而造成的作为其特征的疏松。也见 *gas porosity*（*气孔疏松*）和 *pinhole porosity*（*细缩孔疏松*）。

postheating（焊后加热） 焊接后立即对焊件进行加热，以此作为回火、应力消除或提供受控的冷却速度，以防止产生硬或脆的组织。也见 *postweld heat treatment*（*焊后加热处理*）。

postweld heat treatment（焊后加热处理） 焊接工序之后的任何热处理。

pot （1）（**熔化罐**）。盛装熔化金属的容器。（2）（**电解槽**）。电解还原槽用于以熔化电解质生产（如铝）的一些金属。

pot annealing（罐退火） 同 *box annealing*（*装箱退火*）。

potential （1）（**位势函数**）。用于计算场中任意一点的强度或速度的各种函数。（2）（**电化学反应势**）。*electrochemical reaction*（*电化学反应*）的驱动效应。

poultice corrosion（敷泥状腐蚀） 汽车工业上用于描述车身零件上的一种腐蚀。汽车底盘和带凹槽的零件因气候变化和洗车而受到潮湿，因此粘聚了道路上的盐分和碎屑，由此造成了这种腐蚀。也称为

deposit corrosion（*沉积腐蚀*）或侵蚀。

pouring（浇注） 将熔融的金属从炉子倒入钢包、从钢包倒入钢包或从钢包倒入铸模。

pouring basin（浇口杯） 金属铸造中铸模顶部的杯状浇口，熔融金属经由它而进入浇口或直浇口。

powder（粉末） 指一堆粒度大小范围为1～1000μm的松散颗粒。

powder cutting（粉末切割） 见优先选用术语 *chemical flux cutting*（*化学助熔切割*）和 *metal powder cutting*（金属粉末切割）。

powder flame spraying（粉末火焰喷涂） 各种热喷涂工艺，材料以粉末的形式进行喷涂。

powder forging（粉末锻造） 利用压缩力使粉末冶金坯块进行塑性变形，并充分致密地成形，一般通过加热并在密闭的模具里制成。

powder lubricant（粉末润滑剂） 粉末冶金中，加入混合料里的一种试剂或组分，有利于坯块在模具里的压实和脱出。

powder metallurgy（P/M）（粉末冶金） 制备金属粉末，并利用金属粉末生产实体材料和成形物体的技术和技艺。

powder metallurgy forging（粉末冶金锻造） 见 *powder forging*（*粉末锻造*）。

powder metallurgy part（粉末冶金零件） 用金属粉末制成的成形物体，并以低于其主要组分熔点的温度加热烧结。粉末冶金工艺可以用于制造结构件或机械元件。

prealloyed powder（预制合金粉末） 由两种或多种元素构成的金属粉末，通过粉末冶金工艺将其合金化，构成的金属粉末颗粒具有完全相同的名义成分。

precious metals（贵重金属） 相对稀少、高耐腐蚀和贵重的金属，在周期表里位于周期5与6（属Ⅷ和Ib组）中。它们包括钌、铑、钯、银、锇、铱、铂和金。也见 *noble metal*（*惰性金属*）。

precipitation（析出） 由于温度、压力或两者同时所发生的变化，金属中的一种新的相从固溶体或溶液中分离出来。

precipitation hardening（析出硬化） 由于一种组分从过饱和的固溶体中析出来而导致的金属硬化。也见 *age hardening*（*时效硬化*）和 *age*（*时效*）。

precipitation heat treatment（析出热处理） 金属的一种使组分从过饱和固溶体中淀析出来的金属人工时效。

precision casting（精密铸件） 一种可重复生产的、尺寸精度高的金属铸件，不论其是如何制成的。常与 *investiment casting*（熔模铸件）通用。

precision forging（精密锻造） 按照比工业上常用的标准更小的公差所生产的锻件。借助于精密锻造即可进行净成形或近净成形。也见 *net shape*（*净成形*）。

precision grinding（精密磨削） 利用机器磨削达到规定的尺寸和非常小的公差。

precoat（预涂） （1）在熔模铸造中，将一种耐熔涂料涂敷于蜡或塑料制成的熔模上形成一层薄的涂层，在所用的主要涂料里它作为所要求的底料使用。也见 *investiment casting*（*熔模铸造*）。（2）涂敷薄涂层。（3）指薄涂层。

precoated metal products（预涂金属制品） 表面涂有金属、有机或转化涂层的轧制品，用于制造各种零件。

precracked specimen（预制裂纹的试件） 一种机械试验用试件，事先刻出凹槽并使其承受交变应力，直至槽根处产生裂纹。

preferred orientation（择优取向） 多晶体晶团的一种状态，其晶体方向并不是随机的，而是与其主体材料中的特定方位趋向一致，通常与其加工方向有关，也见 *texture*（*晶体结构、组织*）。

preforming（预成形） （1）金属粉末经初始压制成为坯块，接着还要经过压制工序，但不进行精准或校准压形。（2）粗成形工序，特别是凹腔模锻。

preheating（预热） （1）是进一步的热处理或机械处理之前的加热。在将工具钢加热至中温后立即进行最终奥氏体化。对于某些非铁合金，则加热至较高的温度并维持很长的时间，以便在加工前使组织均匀化。（2）在焊接及相关的工艺里，当加热至中温且维持一短暂时间后，立即进行焊接、铜焊、钎焊、切削加工或热喷涂。（3）在粉末冶金连续炉里进行烧结工序的早期阶段，让润滑剂或粘结剂在无气氛的保护下烧化掉，随后在高温室的保护气氛中进行实际烧结。

presintering（预烧结） 将粉末冶金坯块加热至低于最终烧结的温度，通常是为了增加坯块搬储、固形的容易程度，或者为了在烧结前将润滑剂和粘结剂去除（烧化掉）。

press（冲床、压力机） 具有固定床身和能相对床面的垂直方向作往复移动的滑块或锤头的机床，滑块安装在机床框架的导轨里。也见 *hydraulic press*（*液压机*）、*mechanical press*（*机械压机*）和 *slide*（*滑块*）。

press brake（弯板机或弯边机） 一种开架式的单作

用压力机。用于弯曲、落料、压制波纹、卷边、冲槽、多孔冲、开孔、冲轧或冲制薄板金属或中厚板。

press-brake forming(折边成形) 一种金属成形工艺，工件置于开式下模的上面，然后被上模压入下模内，上模是由弯板机的锤头部分所驱动的。该工艺主要用于相对长而窄的零件，因为这种零件不适宜冲压成形；它还适用于由于生产批量太小用辊轧成形其工装成本很不合算的一些用途上。

pressed density(压制密度) 未经烧结的坯块的单位体积重量。

press forming(压制成形) 任何在机械压力机或液压机上用工装进行薄板金属成形的工序。

pressing area(受压面积) 指在金属成形的压力机上的机座、挡块、镶条、镶条滑道或拉紧杆的台阶之间的间隔距离(自左至右)乘以其工作台前后总距离所得的面积。有时也称之为工作面积。

pressing crack(压制裂纹) 在坯块从模子里脱出的过程中，未经烧结的粉末冶金坯块(生坯)所产生的断裂。有时也将其称为滑裂。

press quenching(加压淬火) 一种淬火，在淬火开始以前先给热模加压，并使模子与零件合在一起。然后使零件以受控的方式与淬火介质相接触。这种工艺可避免零件翘曲变形。

pressure casting (1)(**压铸**)。在如模铸、离心铸、冷室压铸及挤压铸的铸造过程中，给熔化金属或塑性金属施以压力。(2)(**压铸件**)。给熔化金属或塑性金属施以压力而铸成的铸件。

pressure-controlled welding(受控压力焊接) 一种电阻焊的变型，在压力顺序装置的控制下由若干个电极依次起动完成许多个焊点或凸焊点。

pressure gas welding(压力气体焊接) 一种氧气焊接工艺，利用燃料气体和氧气的燃烧所产生的气体火焰进行加热并施以压力，无需钎料即可使全部对接表面同时实现连接。

pressure sintering(压力烧结) 一种热压技术，通常使用低载、高烧结温度、连续或断续烧结以及包含粉末的简单模具。虽然压力烧结和热压两个术语可以互换使用，但两种工艺间还是存在着明显的差别。压力烧结重点是其热过程，而热压的主要工艺变量是作用压力。

pressure welding(压力焊接) 见优先选用术语 *cold welding(冷焊)*、*forge welding(锻造焊接)*、*pressure-controlled welding(受控压力焊接)* 以及 *solid-state welding(固态焊接)*。

primary creep(初始蠕变) 最早或起始阶段的蠕变，或与时间有关的变形。

primary crystals(初始晶体) 在金属凝固过程中首先从金属里分离出来的晶体种类。

primary metal(原始金属) 从矿石中提炼出的金属，并不含有回收的金属废料。比较 *native metal(自然金属)*。

primary mill(初轧机) 用于将钢锭或经过轧制的钢锭制品轧成方坯、初轧坯或扁坯的轧机。这种轧机常叫做 *blooming mill(初轧机、开坯机)*，有时也叫开坯轧机。

principal stress(normal)(主应力(法向)) 在所考虑平面上某一点的最大或最小法向应力值，而且是相对于该平面上所有可能的方向而言的。在该主平面上切应力为零。有三个互相垂直的主应力。故在某一点的应力状态可以是：①单轴的，在其应力状态里的三个主应力中的两个为零；②双轴的，在其应力状态里的三个主应力中只有一个为零；③三轴的，在其应力状态里的三个主应力中没有一个为零。多轴应力是指双轴或三轴的。

process annealing(工艺退火) 用于软化金属的热处理，以便于进一步冷变形加工。在铁质的薄板和线材工业里，为了后续加工，要将材料加热到接近但不超过下相变温度，随后再冷却。在非铁工业里，要加热到再结晶温度，其时间和温度都为了满足后续冷变形加工的需要。

process metallurgy(工艺冶金学) 从矿石中提取金属并将其纯净化的科学和技术。有时也指化学冶金学。它有两个分支即提取冶金和精炼冶金。

proeutectoid phase(先共析体相) 铁合金中的一种相颗粒。在冷却过程中，它们的析出发生于奥氏体化之后共析转变之前。也见 *eutectoid(共析体)*。

profiling(仿形加工，靠模加工) 任何能在工件上加工出不规则轮廓的工序，为此通常使用仿形器或由模板控制的复制装置。

progressive aging(顺序时效) 在时效循环过程中通过一步步或连续地提高温度进行的时效。也见 aging(时效)，并比较 *interrupted aging(间断时效)* 和 *step aging(分步时效)*。

progressive die(顺序模) 在一条线上安排两个或多个工位的模具，用于对零件进行两次或多次的加工工序。通常每个工位上进行一个工序。

progressive forming(顺序成形) 利用一个或几个分开的模具在顺序的工位上依次进行成形加工。

projection welding(多点凸焊) 一种电阻焊工艺，用

电极将工件紧压在一起，然后当电流通过其电阻所产生的热将金属焊接在一起。由此形成的焊点位于凸出、凸现或交汇的预定点上。

proof(验证) (1)在尖峰工作载荷或压力下对元件或系统进行试验。(2)以任何材料(通常用铅或石膏铸件)再现模具的型腔。

proof load(验证载荷) 一种预定的载荷，一般为工作载荷的数倍。材料在检验合格交付使用前，其试件或构件必须通过该载荷的试验。

proof stress(验证应力) (1)为表明一个零件或构件所能承受工作载荷的能力，规定施加在它上面的应力。(2)会给材料造成规定的永久残留小变形的应力。

proportional limit(比例极限) 材料在不会偏离应力和应变的线性比例关系的前提下，能形成的最大应力。也见 *elastic limit(弹性极限)* 和 *Hooke's law(胡克定律)*。

protective atmosphere(保护气氛) (1)笼罩在要接受硬钎焊、焊接或热喷涂的零件周围的气体或真空，作为气体的组成均按其化学成分、露点、压力、流速等进行控制。例如像惰性气体、经燃烧的燃料气体、氢气以及真空。(2)热处理炉或烧结炉里用的一种气氛，用于保护零件或坯块不受氧化、氮化或由环境引发的污染。

pseudobinary system(伪二元系统) (1)三种组分或三元合金的系统，其中间相也可作为一种组分。(2)通过三元图的某一垂直截面。

puckering(褶皱) 由拉环内壁开始拉拔的部分，在深拉工件上留下的皱纹或波纹。

pull cracks(拉裂纹) 在铸件上，由冷却过程中产生的残余应力所造成的裂纹或者由物件的形状所造成的裂纹。

pulverization(粉碎,研末) 用机械的方法使金属粉末的颗粒粒度减小的工艺，也称之为精磨或机械碾磨。

punch(冲头) (1)模具中的阳模部分——相对其阴模部分而言，后者称为凹模。冲头通常都是一副完整的模具总成中的上面部分，并安装在滑块上或在成套的模具里定位(倒置模例外)。(2)在双动拉模里，冲头是指上模的里面部分，它安装于柱塞(内滑块)上，用于拉伸。(3)冲孔或穿孔的作用，也如 *punching(冲孔)*。(4)指在粉末压模和大多数的金属成形工序中，将材料挤压入模具里的可移动工具。(5)在整形压力机或锻压机床里可移动的模具。(6)在圆棒和管材的挤压工序中将毛坯挤压通过模具的工具，使之形成罐或杯形挤压件的内表面。

punching(冲孔) (1)用模具剪切一个呈封闭形的轮廓，剪切下的薄板外部材料是废料。(2)通过模具剪切加工出一个孔，孔的形状由冲头及与之匹配的下模所确定。小孔的成组冲也叫 *perforating(多孔冲)*。也见 *piercing(开孔)*。

punch press(冲床) (1)一般来说，可指所有的机械式压力机。(2)尤其是指带有固定床身、端置飞轮的开架式冲床，用于冲孔。

punch radius(冲头半径) 冲头的端部，即首先接触上工件的半径。有时也称 *nose radius(刀尖半径)*。

push bench(推拔钢管机、顶管机) 一种用于通过金属薄板的冲盂拉制中型管子的设备，并以压力作用于杯形工件的内底，迫使薄板穿过下模。

pusher furnace(推送式炉) 一种连续炉，零件周期性装入炉子的料箱里进行加热，这些料箱沿着炉膛推向前面的一长列装料箱，以此使装料箱向前推进直至炉子的卸料端，在那里将零件取出。

push welding(手压点焊) 一种点焊或凸焊，用手压住一电极，并让工件或底板作为另一电极。

pyramidal plane(棱锥平面) 在非立方体的晶体中，任何与所有三根轴线都相交的平面。

pyrometallurgy(火法冶金学) 金属的高温提炼和精炼。

pyrometer(高温计) 测量高于液体测温计测量范围的测温计。

pyrophoric powder(自燃粉) 一种当暴露在氧气或空气里其颗粒会自动点火和燃烧的粉末。

Q

quality(质量) (1)一种产品或其应用的性质和特征的总体表征，所谓应用就是基于其满足一定需求的能力(质量的适用性概念)。(2)一种产品或其应用的优秀程度(比较性概念)。常常是根据与标准或在可能的情况下的其他产品或应用进行比较，而做出的主观性判断。(3)一种产品或其应用的性质和特征的定量评价。

quantitative metallography(定量金相学) 通过在金相照片或图像上的定量测定，对显微组织的各种特征进行分析。这种测量的定量参数包括相的体积浓度、晶粒大小、颗粒大小、似颗粒或第二相之间的平均自由路径以及显微组分、颗粒或晶粒的表面积与体积之比。

quarter hard(四分之一回火硬度) 非铁金属和某些

铁合金的一种回火，其特征为抗拉强度取在约为全软到半硬回火之间的中点。

quasi-binary system(准二元系统) 在一个三元或更高阶的系统里，在展示固液与成分熔化的两种物质之间有一种线性的成分系列，它们在所有的温度、压力条件下的各种平衡都只包含在线性系列里所形成的成分相，因此其系列可以用相图里的二元系统来表示。

quasi-cleavage fracture(准解离断口) 一种断裂模式，它具有劈裂型断裂和凹陷型断裂相结合的特征。在某些高强度的金属里，会发现这种中间类型的断裂。

quench-age embrittlement(淬火时效脆化) 低碳钢的脆化，这是由于处于位错上溶质碳的析出以及铁素体中的碳在不同温度下具有不同固溶度而造成的析出硬化。淬火时的效脆化通常是因为钢从稍低于Ac_1(奥氏体开始形成的温度)的温度急速冷却而形成的，它可以通过以较低的温度淬火，使这种脆化降低到最低限度。

quench aging(淬火时效) 经固溶热处理后的快速冷却所形成的时效。

quench annealing(急冷退火,淬火软化) 奥氏体铁合金的退火，即固溶热处理后快速冷却。

quench cracking(淬火开裂) 在高温淬火的过程中发生的金属断裂。这也是经过硬化的高硬度、低韧性的碳钢、合金钢或工具钢零件里最常见的。裂纹往往起源于角焊缝、孔、转角或其他应力集中处，也是由于伴随着马氏体转变而发生的体积变化引起的高应力所造成的。

quench hardening (淬火硬化) (1)适合于α-β合金(最常见的确定为从铜到钛合金)的硬化，通过固溶处理和淬火形成马氏体状的组织而实现这种硬化。(2)在铁合金中，其硬化过程就是先使其奥氏体化，然后以能使其中相当数量的奥氏体转变为马氏体的一定速度冷却。

quenching(淬火) 金属(常常为钢)从某一适当的高温快速冷却。通常利用在水、油、聚合物溶液或盐里浸没来实现这种冷却，不过有时候也用压缩空气。也见 *brine quenching (盐水淬火)*、*caustic quenching (碱性淬火)*、*direct quenching (直接淬火)*、*fog quenching (雾淬)*、*forced-air quench (压力空气淬火)*、*hot quenching (热淬火)*、*intense quenching (强力淬火)*、*interrupted quenching (断续淬火)*、*oil quench (油淬)*、*press quenching (加压淬火)*、*selective quenching (局部淬火)*、*spray quenching (喷洒淬火)*、*time quenching (定时淬火)* 和 *water quenching (水淬)*。

quenching crack(淬火裂纹) 由从高温的快速冷却而产生的热应力，导致在金属里生成裂纹。

quenching oil(淬火油) 在热处理工序里用于淬火金属的油。

R

rabbit ear(兔耳) 在金属成形模的拐角处的一种兔耳形凹坑，以便于坯料的皱褶或折叠。

racking(码放) 将需要进行热处理的金属零件放置在支架或料盘上。这样做的目的是为了使零件保持合适的位置，以免零件在处理过程中发生与热有关的翘曲变形，并使零件相互隔开。

radial draw forming(径向拉伸成形) 在金属薄板的成形中，同时施以切向拉延和径向压缩力。工序是在与模具零件进行切向接触的过程中逐渐完成的。这种成形的特点是它可以得到非常严密的尺寸控制。

radial forging(径向锻造) 一种使用两个或多个移动铁砧或下模的工艺，用于生产沿其长度方向上直径不变或变化的轴类零件，或者具有不同内径或外径的管子。常被误认为是 *rotary forging (摆动碾压)*。

radial marks(径向线痕) 在断裂表面上出现的线痕从断裂源向外发射，用肉眼或低倍放大就能观察到。径向线痕是由不同程度延伸的脆性断裂的相交和连接而形成的。即所谓的剪切线痕。也见 *chevron pattern (波形断口样式)*。

radiation damage(放射性破坏) 一般指当材料置于电离辐射(穿透性辐射)，例如X射线、γ射线、中子、重粒子辐射或核燃料材料中的裂变之中时，其性质所发生的变化。也见 *neutron embrittlement (中子脆化)*。

radioactive element(放射性元素) 至少具有一种能进行自发性裂变并发射出正α粒子、负β粒子或γ射线同位素的元素。

radioactivity(放射性) (1)某些同位素原子核能自发衰变(失去能量)的性质。通常的机制是发射α、β或其他粒子，并发生蜕变(裂变)。在其过程中，γ射线是经常但不是总发射的。(2)从放射源发出的一种特别的组分，如β放射性。

radiograph(射线照相) 一种阴影图像的照相，它是因试件对穿透性辐射的不均衡吸收而形成的。也见 *radiography (射线照相检测)*。

radiography(射线照相检测) 一种无损检测方法，

将试件置于一束 X 射线或 γ 射线的照射下，而造成的对于试件的阴影图像被记录在放置于背后的照相底片或显示在电视监视器（实时射线照相检测）的屏幕上。通过观察可以检测到内部的缺陷，并且对由试件里面的厚度、密度和吸收上的不同所造成的图像上的差异进行解释。也见 *real-time radiography（实时射线照相检测）*。

radius of bend（弯曲半径） 在弯曲过程中，弯曲的内表面与一个销子或心轴保持接触，该销子或心轴的圆柱表面的半径就是弯曲半径。如果是无靠模或半靠模式的 180°弯曲，则可以使用垫片或垫块，这时弯曲半径为垫片或垫块厚度的一半。

rake（齿形角） 齿面或过齿面上的给定一点的切面与一个参考平面或直线之间的角度关系。

ram（锤头） 直落锤或冲床上作下落或移动的零件，在其上面安装了模具的一部分，有时它作为蒸汽锤的上平板模使用。也被称为 *slide（滑块）*。

ramming（捣紧） (1)将型砂、耐熔材料或其他材料填压成为紧实体。(2)将型（翻砂造型）砂在成形模里捣紧。

random sequence（随机序列） 在纵向焊接顺序里，焊道的延伸是按照随机方式进行熔敷，以此将变形减少到最小。

range of stress（S_r）（应力范围） 在一次应力循环中的最大、最小应力的代数差，即 $S_r = S_{max} - S_{min}$。

rapid solidification（快速凝固） 液态（熔化）金属的冷却或淬火范围从 $10^4 \sim 10^8$℃/s。

rare earth metal（稀土金属） 包括元素钪和钇（原子序数分别为 21 和 39）及镧系元素（原子序数从 57～71）的 17 种的金属。

ratcheting（步进式变形） 一种渐进的、周期性的非弹性变形（例如不断长大），当一个部件或构件承受一种叠加在连续初次应力上的周期性二次应力时，就会发生这种变形。当周期性应变是由周期性温度变化所引发的时，这个过程也称为热步进式变形；当周期性应变在起始状态是机械的时，则为等温步进式变形（即使还伴随着周期性的温度变化）。

ratchet marks（步进式伤痕） 在疲劳断裂表面上的一些线纹或伤痕，这是由于起源于多处的疲劳断裂延伸的交汇和连接而造成的。步进式伤痕平行于总体上的裂纹延伸方向，并用肉眼或低倍放大就能观察到。

rate of strain hardening（应变硬化速度） 在塑性范围内，相对于实际应变的实际应力变化速度。

rattail（鼠尾线） 铸件的一种表面缺陷，是由于型砂在砂模里的膨胀而形成的一条或多条不规则线条。比较 *buckle (2)（砂型铸件表面缺陷）*。

reaction sintering（反应烧结） 在金属粉末混合料的烧结中，至少含有两种会在处理过程中发生化学反应的组分。

reactive metal（活性金属） 容易在高温下与氧结合生成非常稳定氧化物的金属，例如钛、锆和铍。活性金属会因填隙吸收氧、氢和氮而变脆。

real-time radiography（实时射线照相检测） 一种无损检测方法，将二维射线照相的图像实时地显示在电视监视器的屏幕上。这种技术并不会创生潜像，相反它还能将未能吸收的射线转化为光学或电子信号，这样马上就可以观察或者通过电子和视频设备进行准实时的处理。也见 *radiography（射线照相检测）*。

reaming（铰孔） 一种孔的精加工工序，利用单刃或多刃（齿）的旋转切削刀具（铰刀）对粗加工孔的尺寸和形状进行精密加工。在其切削过程中，主要依靠工件本身支承铰刀的加工。

recalescence（相变再辉） (1)材料经过冷却之后的温度再度升高，因为在材料的转变过程中释放热量的速度超过其消耗热量的速度。(2)在铁或钢冷却（过冷）中的一种与 γ 铁转化为 α 铁有关的现象。由于转化潜热的快速释放而导致温度的突然升高，从而在金属表面出现光辉（再炽热）。比较 *decalescence（相变吸热）*。

recarburize（再渗碳、增碳） (1)通过加入含碳材料、高碳生铁或高碳合金增加铁液或钢液中碳的含量。(2)通过渗碳使金属零件表面曾经在工艺处理中丧失的含碳量得以恢复，即所谓的碳复原。

recess（凹陷） 表面的沟槽或凹坑。

recovery (1)（**应变复原**）。试件在与试验开始相同不变的温度里卸载后，其应变随时间而减小的部分。其应变复原等于总的应变减小量减去其瞬间的恢复量。(2)（**加工硬化的消减**）。金属不必移动其大角度的晶界就可使其加工硬化的效应得以减小或消除。(3)（**回收率**）。矿石通过处理，从中收集到的所要求的组分部分，通常用百分比表示。

recrystallization（重结晶） (1)通常借助于加热将存在于经冷变形加工的金属中的晶粒组织更新为无应变的晶粒组织。(2)在加热或冷却经过一个临界温度的过程中，发生的由一种晶体组织变成为另一种晶体组织。(3)指同种物质的不同晶体类型的此消彼长而晶粒更细化的过程，一般都为物理过程。也见 *crystallization（结晶化）*。

recrystallization annealing（重结晶退火） 冷变形加

工金属退火生成新的晶粒组织，而不发生相变。

recrystallization temperature(重结晶温度) 能在规定时间内完成冷变形加工金属的重结晶的几乎最低的温度。

recrystallized grain size(重结晶晶粒尺寸) (1)通过加热经冷变形加工金属而使晶粒大小得到改善。选择合适的时间和温度可以使得重结晶完成而晶粒却基本上没有增长。(2)在铝镁合金中经过重结晶的晶粒大小与晶粒的生长或重结晶条件无关。也见 *recrystallization (重结晶)*。

recuperator(回流换热设备) 将燃烧生成的气体热量送回到作为进气的空气和燃料中去的设备。让进气材料通过盘绕在一个热交换室里的管子，而排放的气体则从该室里经过。

red mud(红泥浆) 一种氧化铁含量较高的残渣，是在用拜耳法生产铝时为了纯化铝矾土而产生的。

redox potential(氧化还原电位) 这是以相对于某一参考电极进行测量的可逆性氧化还原电极的电位，作为已知的电极它要被校正为氢电极。

redrawing(重拉深) 二次并连续深拉工序，在该工序中杯形冲制件被拉深，而横截面的尺寸则被减小。也见 *deep drawing*(深拉)。

reducing agent(还原剂) (1)一种能引起还原反应的化合物，因此其本身被氧化掉。(2)一种化学物质，它能在高温下降低其他批量的化学物质的氧化状态。

reducing atmosphere(还原气氛) (1)一种炉内气氛，能将炉内装载的物质或材料中的氧去除。(2)一种化学活性的保护气氛，在高温下它能将金属氧化物还原成其金属状态。还原气氛也是相对而言，而且这样的气氛可以还原成一种氧化物，但不能还原成别种氧化物。

reducing flame(还原火焰) (1)一种气体火焰，形成时其内焰有过量的燃料。(2)由含有过多的燃料或过少的空气所混合的燃料经燃烧生成的一种气体火焰。也见 *neutral flame (中性火焰)* 和 *oxidizing flame (氧化火焰)*。

reduction (1)(**收缩**)。在冲盂或深拉中从毛坯直径到杯形直径的减小百分比，或在再拉深中的直径收缩的度量。(2)(**收缩**)。在锻造、轧制和拉伸中原始横截面与最终横截面之比，或横截面的减小百分比。(3)(**还原**)。一种由于俘获电子而使原子价减小的反应。对照 *oxidation (氧化)*。

reduction cell(还原电池) 在装有盐的水溶液或熔化盐的槽或罐里进行的电解还原，以此形成自由金属或其他物质。

reduction in area(面积收缩,RA) 拉伸试件的原始横截面积，与其材料经受按规定的试验发生断裂之后或在断裂处的最小截面积两者之间的差值，即所谓的面积的减小。

reel (1)(**卷轴**)。用以卷绕或进给线材或带料的轮轴或轮毂。(2)(**校直**)。圆棒通过带有轮廓的辊子之间被矫直碾平。

reel breaks(卷轴破裂) 卷材的连续内接面上的横向破裂或起折，这是由于卷材的引导端在分体式夹持卷轴上的挤皱而造成的。也叫卷轴扭折。

reference electrodes(参比电极) 一种已知的并具有高可复制性电位的无极性电极，用于电位和伏安测量的分析。也见 *calomel electrode (甘汞电极)*。

reference material(参考材料) 在材料的性能鉴定中作为标定和标准化使用的材料，它具有经定义的化学成分，且其理化性质与分析人员所要分析的材料十分相似。也见 *standard reference material (标准参考材料)*。

refining(精炼) 冶金工艺的一个分支，对粗炼或不纯净金属的提纯处理。比较 *extractive metallurgy (提取冶金)*。

reflowing(软熔) 电镀层的熔化再凝固。使表面具有热浸镀表面的外观和物理特征(特别是电镀锡或锡合金的薄板)。也叫 *flow brightening (流动增亮)*。

refractory(耐熔,耐火) (1)具有非常高熔点的材料(通常为无机的、非金属的或陶瓷的材料)，其性质适合用于炉衬和烘窑的构件。(2)耐热特性。

refractory alloy(耐火合金) (1)耐热合金。(2)具有极高熔点的合金。也见 *refractory metal (耐火金属)*。(3)在高温下难以加工的合金。

refractory metal(耐火金属) 具有极高熔点和低蒸汽压力的金属，如铌、钽、钼、钨和铼。

regenerator(交流换热器,交流蓄热器) 与 *recuperator (回流换热设备)* 相同，此外还利用生成的气体或燃烧加热连接炉子排放侧管的气室中砖格砌体，而进气和燃料在连接进口侧管的第二气室中被砖格砌体加热。隔了一段时间后气流换向流动，进气和燃料与热的砌体相接触而使排放气体再次加热第二气室。

regulator(自动调节器) 以某种恒压方式控制焊接气体或切割气体供给的装置。

reliability(可靠性) 对产品或应用在一定时期内满足其功能要求的能力的一种量化的度量。

relieving(使成浮雕状的处理) 对于金属浮凸表面的

高点进行抛光或其他研磨处理，使之产生高亮度，并与其表面凹处的表面粗糙度成为鲜明的对照。

remanence(顽磁) 当作用的磁化力撤销之后，在磁路里剩余的磁感应强度。有时也叫剩磁感应强度。

repressing(再压,补压) 对已经压制和烧结的粉末冶金坯块再次施压，一般其目的是为了改善某些物理或力学性能，或者是为了提高尺寸精度。

residual element(残留元素) 合金里存在的少量不需要的元素。

residual stress(残余应力) (1)存在于物体内静止的、平衡的、温度均匀的和物体不承受外力时的应力。常产生于成形和热变形加工的养护性工艺中。(2)一种与外力无关的内应力，它是由诸如冷变形加工、相变或温度梯度等因素造成的。(3)存在于物体内而与外力或热梯度无关的应力。(4)由于热处理、机械处理或两者兼之而遗留在结构或零件里的应力。应力由熔焊引起的，主要因为当焊接金属从固溶线冷却至室温时所发生的收缩。

resilience(回弹) (1)卸载后从单位体积里释放出来的能量。(2)材料由于高屈服强度和低弹性模量而形成的性能，从而展示了卸载后相当大的弹性回复。

resinoid wheel(树脂粘结砂轮) 用人造树脂粘结的砂轮。

resist(保护膜) (1)用于覆盖和保护基体上所选部位的涂层材料，以防止遭受腐蚀剂、软钎料或镀敷的作用。(2)用于防止硬钎料流到不应到的区域的材料。

resistance brazing(电阻硬钎焊) 一种硬钎焊工艺，其所需要的热量是通过电流流经电路中的电阻获得的，工件也是电路中的一部分。

resistance seam welding(电阻缝焊) 一种逐渐沿接缝长度进行电阻焊的工艺，使零件的搭接表面压紧后焊合在一起。焊缝可以是由一系列搭接的焊接熔核或一条连续的焊接熔核组成；或者当焊接电流流经电阻产生的热量使接点达到焊接温度时，锻压其接点来形成。

resistance soldering(电阻软钎焊) 一种软钎焊工艺，其所需要的热量是通过电流流经电路中的电阻获得的，工件也是其电路中的一部分。

resistance spot welding(电阻点焊) 一种利用焊接电流从电极流经工件的电阻所产生的热量使压紧表面焊合在一起的电阻焊工艺。电极起到集中焊接电流和对焊接区域施加压力的作用。

resistance welding(电阻焊) 以电阻加热并施以压力实现金属焊合的一类焊接工艺。也见 *flash welding (电火花对接焊)*、*projection welding (多点凸焊)*、*resistance seam welding (电阻缝焊)* 和 *resistance spot welding (电阻点焊)*。

resistance welding electrode(电阻焊电极) 点焊机上的一(或多)个零件，在很多情况下，焊接电流和压力都是通过它直接作用于工件。电极可以做成旋转轮、旋转棒、圆柱体、平板、钳夹、卡盘，或由此改进的各种形状。

restraint(约束) 任何能够阻止零件移动的机械外力，并由其调节因热胀冷缩而引起的尺度变化。常应用于在夹具中夹住进行焊接的焊接件。比较 *constrain (制约)*。

restriking(矫形锻压) (1)通过一次或多次的锻压对已经过切边的但还略带有一点不对中的，或者还存在着一些瑕疵的锻件进行整形，以此改善其对中性、提高表面质量、满足较小的公差要求、提高硬度，或者实现其他方面的一些改进。(2)一种利用精压或压延来纠正或改变轮廓形状并消除变形的校准工序。(3)粗锻工序后的一种补救工序，将工件放在与其上一次锻压相同的模具里进行再锻压。

retort(蒸馏瓶) 蒸馏挥发性材料所使用的容器，如用于某些金属的分离和煤的干馏。

reverberatory furnace(反射炉) 一种用火焰熔化金属的炉子，但火焰不是直接对着金属表面，而是通过炉膛壁的反射加热。实际上金属是被炉壁和炉顶产生的热所熔化的。

reverse-current cleaning(反向电流清洗) 利用电流通过溶液在电极之间流动的电解清洗，而零件作为阳极放置。也见 *anodic cleaning (阳极清洗)*。

reverse drawing(反向拉深) 薄板零件以与其原来拉深相反的方向再次进行拉深。

reverse polarity(反向极化) 见优先选用术语 *direct current electrode positive (直流正极焊, DCEP)*。

reverse redrawing(反向再拉深) 以与其原来拉深相反的方向进行的第二次拉深。

rheocasting(流变铸造) 通过连续搅拌半固体状的金属浆进行铸造。其工艺包括在金属凝固的早期阶段用强劲的搅拌使固态晶枝破碎成为小的晶体球粒。也见 *semisolid metal forming (半固态金属成形)*。

rib(加强肋) (1)一种V形或圆弧形的长条压痕，用于强化大的金属薄板。(2)一种锻件上长条的，通常较薄的凸肋，用于提供抗弯强度(一种有肋板的锻件)。

rigging(铸模制造) 用于铸件生产的工程设计、配置以及模型设备的制造，包括铸件凝固过程、浇铸

与浇口、冒口、撇渣和砂箱合型的研究。

rimmed steel(沸腾钢) 含有足够氧化铁的低碳钢，于是当铸锭凝固时，一氧化碳能连续地释放出来，形成基本上不含孔隙的金属外表或外缘。因而用沸腾钢铸锭制成的薄板和带钢产品具有非常好的表面质量。

ring and circle shear(环形剪和圆盘剪) 有两片圆盘刀片协调旋转的切割或剪切机，还配置了能从金属薄板上剪切内圆或圆环的圆形工作台附件，而用直边剪切机是不可能开始这种剪切的。一根刀片轴倾斜于另一根刀片轴由此形成切割的间隙，从而使外切面保持平直并可供后续利用。也见 *circle shear (圆盘剪)* 和 *rotary shear (回转剪)*。

ring rolling(圆环辊轧) 利用冲制圆盘成形无焊缝圆环的工艺，或在轧辊之间成形厚壁环形毛坯的工艺，由轧辊控制壁厚、环的直径、高度和轮廓形状。

riser(冒口) 与铸件相连的熔化金属的熔池，在铸件凝固前和凝固过程中，由于金属收缩的需要而对铸件进行补充。

riser blocks(调整垫块) (1)垫在金属成形压力机机身顶面或工作台台面与下模之间的平板或垫块，以此减小模具间隙的宽度。(2)在四点直柱曲柄压力机上，垫于工作台和机座之间的垫块，用于增加闭合高度。

river pattern(河流样式) 断口组织照片的分析用术语，用于描述在由解理形成分离的晶粒断裂表面上沿着平行于局部的裂纹扩张方向流动形成的一种解理台阶的特征性样型。

riveting(铆接) 用金属铆钉将两个或多个构件连接在一起，当铆钉放置到位后，无需加热就可将端部镦粗。

roasting(烘焙) 加热一种矿石，使之发生某种便于熔炼的化学反应。

robber(辅助阴极) 一种另外设置的阴极或延伸阴极，用于减小电镀工件上本属于高电流密度区域的电流密度。

Rochelle copper(罗谢尔铜) (1)由氰化铜电镀溶液里获得的电沉积，即为了使晶粒细化并具有更好的阳极腐蚀和阴极的有效性，在溶液里添加了罗谢尔盐(酒石酸钠钾)。(2)可用于得到罗谢尔铜电镀的溶液。

rock candy fracture(冰糖样断裂) 显示为碎晶面的一种断裂，最常见的是用于描述大晶粒金属的沿晶界断裂。

rocking shear(摆剪) 一种闸刀式剪切机，利用曲线形刀片逐渐地从一边到另一边的摇摆运动来剪切金属薄板。

Rockwell hardness number(洛氏硬度值) 当作用于压头的载荷从一个确定的小载荷增大到大载荷，然后再回到先前的小载荷时，从压痕的深度净增值推导得到的数值即为洛氏硬度值。按照所测材料的硬度建立了不同的洛氏硬度值刻度。用硬度标记的后缀字母表示其刻度。例如 64HRC 代表洛氏 C 刻度的洛氏硬度值为 64。也见 *Rockwell superficial hardness number (洛氏表面硬度值)*。

Rockwell hardness test(洛氏硬度试验) 使用一种经过标定的设备进行压痕硬度的试验，即测量在恒定压力作用下的压痕深度。所用压头为略带圆头的 120°金刚石圆锥体或 1.6 或 3.2mm(1/16或1/8in)直径的钢球。

Rockwell superficial hardness number(洛氏表面硬度值) 洛氏表面硬度值像洛氏硬度值一样也用符号 HR 后紧跟刻度规定符号。例如 81HR30N 代表在 30N 刻度上的洛氏表面硬度值为 81。

Rockwell superficial hardness test(洛氏表面硬度试验) 像测试洛氏硬度值一样进行测试，只是用的大载荷和小载荷都分别小一些。在洛氏硬度试验中，小载荷为 10kgf，而大载荷为 60kgf、100kgf 或 150kgf。在洛氏表面硬度试验中，小载荷为 3kgf，而大载荷为 15kgf、30kgf 或 45kgf。在两种试验中，压头可以是金刚石圆锥体或钢球，这主要由测试的材料决定。

rod(圆棒) 实心圆金属，截面直径为 9.5mm(3/8in)或更大，其长度相对直径要大得多。

rod mill (1)(**圆棒轧机**)。轧制圆棒的热轧机。(2)(**棒磨机**)。用于精磨的磨机，有些类似于球磨机，但在其精磨中用的不是球而是长的圆钢棒。

roll bending(辊弯) 借助于辊子将薄板、棒料和型材弯成弧形。也见 *bending rolls (弯曲轧辊)*。

roll compacting(辊轧压实) 利用辊轧机将金属粉末逐渐压实。

roller hearth furnace(辊底式炉) 推送式连续炉的一种改进型，在其炉膛或马弗炉膛安装有辊轮，故摩擦力大为减小，还可以重复使用轻便的料盘，而且避免因为变形和损坏而导致工件不合格的风险。也见 *pusher furnace (推送式炉)*。

roller leveler breaks(辊压矫平裂痕) 一种清晰的横向裂痕，通常约相隔 3~6mm(1/8~1/4in)，是由于在辊压矫平的过程中金属薄板发生的弯折所致。它

们经压延也无法去除。

roller leveler lines(**辊压矫平线痕**)　同 *leveler line*(*矫平线痕*)。

roller leveling(**辊压矫平**)　让平金属薄板坯通过一种有一系列交错排列的小直径轮子的机器，调整这些轮子可以形成重复地来回弯曲，以此矫平材料。

roller stamping die(**辊子打印模**)　使用有雕刻的辊子在金属薄板上压出图案或记号。

roll flattening(**轧辊矫平**)　让金属薄板分别通过二辊式冷轧机，并以此成批地将其进行辊压平整，而不会产生变形。不要与 *roller leveling*(*辊压矫平*)相混淆。

roll forging(**辊锻**)　毛坯在两个受驱动的辊子之间辊压成形的工艺，两个辊子以相反方向滚动，并在辊子上还有一对或多对相吻合的沟槽。这种工艺可用于生产成品零件或作为后续锻造工艺的预成形加工。

roll forming(**轧制成形**)　使用动力驱动的辊子进行金属成形加工，其辊子的轮廓决定了产品的形状，有时也用于指强力旋压的工艺。

rolling(**辊轧**)　利用旋转辊子使金属毛坯的截面积缩小，或将其作为金属产品的一般性成形。也见 *rolling mills*(*轧钢机*)。

rolling-contact fatigue(**滚动接触疲劳**)　一个固体表面由于与另一个或几个固体表面的滚动接触所承受的重复性应力。轴承或齿轮表面的连续滚动接触疲劳会导致滚动接触破坏，其形式为亚表层的疲劳裂纹的扩张和/或材料表面的点蚀和剥落。

rolling mills(**轧钢机**)　用于压缩金属毛坯横截面积，并当金属从安装在一个机架里的两个旋转辊子之间通过时，形成一定形状的机器，这个机架构成一个称为轧机机座的基本单元。圆柱形的辊子生产出平板形的产品，带槽的辊子则可生产出圆形、方形和各种结构型材。也见 *four-high mill*(*四辊式轧机*)、*Sendzimir mill*(*森吉米尔轧机*)和 *two-high mill*(*二辊式轧机*)。

roll straightening(**轧辊矫直**)　不同型材的金属毛坯的矫直，即使其通过一般都是处于水平面或垂直面上的一系列交错排列的辊子，或者在二辊矫直机里进行旋轧。

roll threading(**辊压螺纹**)　见优先选用术语 thread rolling(搓压螺纹)。

roll welding(**辊压焊接**)　固态焊接，先将金属加热，然后通过辊子施加的压力足以使其接触表面产生变形，由此焊接在一起。也见 *forge welding*(*锻造焊接*)。

root crack(**焊缝根部裂纹**)　在焊缝中或在其根部的热效应区域的裂纹。

rosette　(1)(**蔷薇状分布的显微组分**)。金属中按圆形分布的显微组分，一种由中心向外呈漩涡或辐射状的排列。(2)(**应变片花**)。在一个位置点上以三个不同方向的方式放置的应变片。

rotary forging(**摆动碾压**)　一种工件在平砧与带有锥形工作面的回转(摆动)模之间进行碾压的工艺，在其碾压的过程中，模板相对而动。也叫轨迹锻。比较 *radial forging*(*径向锻造*)。

rotary furnace(**回转炉**)　按环形构建的加热炉，加热过程中炉膛及工件绕炉轴转动。也叫回转炉膛炉。

rotary press(**回转压力机**)　一种粉末冶金零件的成形机器，工件放置在安装有多副模具的回转工作台上，模具用于粉末压实。

rotary retort furnace(**回转蒸馏炉**)　一种连续型的炉子，里面的工件借助于内螺旋前进，因此能很好地控制工件在加热室里的保留时间。

rotary shear(**回转剪**)　一种金属薄板剪切机床，两片旋转圆盘剪切刀片安装在两根协调驱动的平行轴上。

rotary swager(**回转模锻机**)　一种旋锻机床，上面有动力驱动的高速旋转圆环，以使滚轮贴紧凸轮表面，并带动模具高频锤击工件，以此生成直形和锥形两种截面。

rotary swaging(**回转模锻**)　一种体积成形工艺，使用一副或多副的对置式模具通过反复的径向锤击使工件横截面积减小，或使棒材、管材或线材的形状得以改变。

rouge finish(**红丹表面粗糙度**)　一种利用红丹粉(粒度极细的氧化铁水化物)或其他极细研磨剂进行抛光得到的、具有高反射率的表面粗糙度。其外观与光亮抛光或镜面抛光的英国银器具很相似。

rough blank(**粗坯料**)　金属成形或拉深工序所用的毛坯，通常有不规则的轮廓，还要为金属工艺半成品留有必要的轧制件裕量，在成形或拉深后再将其修整到要求的尺寸。

rough grinding(**粗磨**)　与表面粗糙度无关的磨削，通常在其之后还有后续工序。

roughing stand(**粗轧机**)　第一台(或前若干台)轧机机座，经再加热的钢坯通过其轧制后，再从精轧机机座的前面进入精轧。也见 *rolling mills*(*轧钢机*)和 *stand*(*轧机机座*)。

rough machining(粗加工) 与表面粗糙度无关的切削加工，通常跟随其后还有后续工序。

roughness(粗糙度) (1)相对微小空间范围内的表面凹凸不平度，其高度、宽度和方向成为最主要的表面形式特征。(2)表面凹凸之间的峰-谷显微间距。也见 *surface roughness(表面粗糙度)*。

rubber forming(橡胶成形) 在金属薄板成形的过程中，使用橡胶或其他弹性材料作为一件功能性的模具零件。对于橡胶只是用于盛装压力流体的工艺，则不属于橡胶成形。

rubber-pad forming(橡胶垫成形) 一种适用于浅凹零件的金属薄板成形工序；一块受约束的柔韧橡胶垫贴附在冲压滑块(锤头)上，在压力流体的作用下，它成为位于压力机床身或底板上的一个冲头或一组冲头的贴合模。即所谓的 *Guerin process(格林工艺)*。格林工艺的不同变型，如 *fluid-cell process(流体囊工艺)*、*fluid forming(流体成形)*、*Marforming process(橡胶膜压制成形工艺)*。

rubber wheel(橡胶砂轮) 一种用橡胶粘结的砂轮。

runner(流道) (1)熔化金属从一个储槽进入另一个储槽的通道。(2)铸件浇口组件中连接(数个)直浇口和注入口的部分。(3)在模型和成品铸件上，相应于(2)所述的浇口组件中的那部分零件。

runner box(浇口箱) 在熔化金属进入铸模型腔前，将其分流成几股的分配盒。

runout(跑火、漏钢) (1)熔化金属从铸型、坩埚或炉子里跑漏出来，这种情况是不希望发生的。(2)金属从铸型里跑漏出来而造成的铸件上的瑕疵。

rupture stress(破裂应力) 发生损坏时的应力，即所谓的 *breaking stress(破碎应力)* 或 *fracture stress(断裂应力)*。

rust(锈蚀) 一种可见的腐蚀生成物，由氧化铁的水化物构成。仅指铁合金。也见 *white rust(白锈)*。

S

sacrificial protection(阴极腐蚀保护) 在电解液里，通过电化偶合作用使金属更加阳极化，以此减少其腐蚀，故属于阴极保护。

saddling(撑环) 将穿孔的圆盘套在一根芯棒(撑棍)上进行锻碾，最后成形为一个无缝的金属圆环。

sag(塌箱、塌芯) 由于上型箱的型砂或型芯的强度不足而造成的铸件截面厚度的增加或减少。

salt bath heat treatment(盐浴热处理) 在熔盐的浴池里，进行的金属热处理。

salt fog test(盐雾试验) 一种加速腐蚀的试验，将试件置于一般含有氯化钠溶液的细雾之中，但有时也改用其他化学物质。即所谓的盐雾喷洒试验。

salt spray test(盐雾喷洒试验) 见 *salt fog test(盐雾试验)*。

sample(样品) (1)从一批或工艺流量中抽取的一件或几件产品(或较为少量的散状材料)，然后通过试验或检验得到该批或工艺流量的有关性质、尺寸或质量特征方面的数据。(2)用于代表整体的一部分材料。

sand(砂子) 通过将岩石或矿石进行分解或粉碎而得到的天然或人造颗粒材料。在铸造中的这个术语指的是单个颗粒直径为 0.06 ~ 2mm(0.002 ~ 0.08in)的集合体，它们大多不含在天然砂石中，往往存在于如淤泥、粘土之类更细的组分。最常用的翻砂用的型砂是二氧化硅，而锆石、橄榄石、硅酸铝及其他经粉碎的陶瓷则应用于一些特殊用途。

sandblasting(喷砂处理) 以砂作为磨粒的喷砂处理。也见 *blasting or blast cleaning(喷砂,喷丸或喷砂,喷丸清理)*，比较 *shotblasting(喷丸处理)*。

sand casting(型砂铸件) 用砂模生产金属铸件。

sand hole(砂眼) 因型腔表面的掉砂在型砂造型的铸件表面上的沉嵌，而在其表面形成的麻点。

sandwich rolling(异种金属薄板叠轧) 两种或多种金属带材叠合在一起轧制，有时候会成一种轧焊的复合材料。

satin finish(无光表面粗糙度) 金属表面的漫射表面粗糙度，有光泽但又不像镜面那样。属于一种无光精整的表面粗糙度。

saw gumming(用树胶砂轮刃磨锯齿) 在锯条生产中，用于在齿槽(锯齿间的间隔)中磨去冲制或铣削所留下的痕迹，在一些情况下，可同时使其齿锐利。当要修整钝的锯条时，则用于恢复原来的齿槽大小和形状。

sawing(锯切) 用带齿的带锯或圆锯片割断零件或切割出轮廓。

scab(铸痂、铸件表面粘砂) 铸件表面的一种缺陷，看上去粗糙、稍有突起的表面瑕疵，并结为一层薄的疏松金属表层，在其下面通常是夹有一层砂子的蜂窝状或孔隙组织；缺陷常位于铸件的薄壁部分或型腔的热区附近。

scale(氧化皮) 表面氧化物，成为一种腐蚀物的局部粘附层遗留在受到加热的金属上，或在空气或其他氧化气氛中的铸件上。

scale pit (1)(铁鳞坑)。生成在锻件表面的一种表面凹坑，是由在锻造过程中残留于锻模表面的氧化

皮造成的。(2)(**轧屑回收池**)。设置在地面上的一个凹池，作为处理流出废水的一个步骤，使轧屑(如被冷却液从轧机中携带出来)在池里沉淀出来。

scaling (1)(**起氧化皮**)。在高温下金属表面生成的厚层氧化物。起氧化皮与生锈是有区别的，后者就是水化了的氧化物的生成。也见 *rust*(*锈蚀*)。(2)(**水垢**)。正如在冷却水管和水锅炉里，其金属表面淀析出的不溶于水的组分。

scalping(**刮表层**) 从铸锭、钢坯和扁坯上除去表层。

scanning Auger microscopy(**扫描俄歇显微镜,SAM**) 一种分析技术，即通过记录各种元素相对于其电子束位置的俄歇电子强度测量元素在材料表面的横向分布。

scarfing(**气刨**) 切除金属物体的部分表面积，通常使用氧燃气炬。用这种方法可以将铸锭、钢坯的表面缺陷切除，或者用于中厚板的边沿切成斜坡，以便对缝焊接。也见 *chipping*(*修整*)。

Scleroscope hardness number(**HSc 或 HSd**)(**肖氏硬度值**) 带有金刚石尖头的锤头落在受试材料后回跳的高度，肖氏硬度值就是与此有关的数值。它是在一个用 AISI W-5 工具钢经淬火而不回火(达到最高硬度)制成的试块上回跳的平均高度被分成 100 个单位的刻度上进行测量。

Scleroscope hardness test(**肖氏硬度试验**) 在一种经过标定的仪器上进行动态压痕的硬度试验，用一个带金刚石尖头的锤头从设定的高度落到待测材料的表面上，锤头回跳的高度就是材料硬度的测量值。

scorification(**铅析金银法**) 在有助熔剂存在的情况下，使含有贵重金属的铅氧化，然后从中部分地去除铅，以使贵重金属得以富集。

scoring(**划伤**) (1)沿滑动的方向划出严重的伤痕。(2)用划线仪器的划针在表面移动划出刻痕或窄的沟槽。(3)粘附在冲头或下模表面上的轧屑，给成形金属零件留下的压痕或刻痕。(4)材料沿某一方向上的厚度减小，而有意使其在该方向上的强度减弱。

scouring (1)(**擦洗**)。湿或干的清洗工艺，包括机械擦拭。(2)(**抛磨**)。湿或干的机械抛光、打磨工序，使用细磨料和低压力，用手工或用布或线轮进行抛磨，形成一种无光的或无光精整型的表面粗糙度。

scrap(**废品**) (1)(**废品**)。由于缺陷或其他不适合销售的原因，应当废弃的产品。(2)(**废料**)。无论来源于何处所有被废弃的金属材料，不过它们都可以通过熔化或重炼予以再利用。

scratch hardness(**刻痕硬度**) 用刀尖以一定的压力在金属表面划出一条划痕，按此划痕的宽度确定金属的硬度。

screen(**丝网**) (1)有方形网孔的钢丝网或编织布，用于筛留尺寸大于特定网目大小的颗粒。美国标准、ISO 或泰勒丝网大小都是常用的标准。(2)用以网孔大小命名的一套筛网中的一个给颗粒聚集物如砂子、矿石或焦炭按大小定级。(3)一种放置在铸模浇口系统里的孔板，用于撇除熔化金属的杂质。

screw dislocation(**螺旋位错**) 见 *dislocation*(*位错*)。

screw press(**螺旋压力机**) 一种高速压力机，其锤头通过一个由机械动力驱动的大型螺旋装置来实现其锻压动作。

scuffing(**胶合**) (1)由于在滑动表面之间的固相焊合而产生的一种表面局部化损坏，而非表面局部熔化。(2)一种由摩擦热引起的表面微凸体焊死而造成的轻度拉伤，经焊死的微凸体因断裂而导致表面发生劣变。

seal coat(**封涂**) 一种利用材料渗补表面上因热喷镀所形成的孔隙的方法。

sealing(**密封**) (1)封补阳极镀层中的孔隙，用于涂补其吸附剂的不足。(2)铸件上的堵漏，将热固性塑料涂敷于表面的疏松部位，再通过加热使其固化。

seal weld(**封焊**) 一种主要用于特定程度防漏紧固的焊接。

seam(**接缝**) (1)在金属表面看似裂缝的尚未焊合的折叠或皱皮，通常是由于其材料的断续所致。(2)铸件表面与 *cold shut*(*冷叠合疤*)有关，但程度上较轻的一种缺陷。(3)因铸型表面上的裂缝造成的铸件表面的皱脊。

seam weld(**焊缝**) 在搭接的两个零件之间或在其上面的连续焊道中，表面间的粘结起始并发生在两者的接触面上，或从其中一个零件的外表面上进行。连续焊道可以由单一的焊道或一系列的依次叠压的焊点组成。

seam welding(**缝焊**) 见 *arc seam weld*(*电弧缝焊*)和 *resistance seam welding*(*电阻缝焊*)。

season cracking(**老化**) 过去使用的已淘汰术语，通常用作黄铜的 *stress-corrosion cracking*(*应力腐蚀开裂*)。

secondary alloy(**二次合金**) 任何以回收的废料金属作为其主要组分来源的合金。

secondary creep(**二次蠕变**)　见蠕变。

secondary ion mass spectroscope(**二次离子质谱仪，SIMS**)　一种分析技术，即将材料置于入射的离子束中，然后检测从表面发射出来的离子质量。入射离子通常都是单能的，而且全都属于同种类型的离子，例如5 keV的Ne^+离子。

secondary metal(**二次金属**)　由废料通过重熔和再炼回用的金属。

sectioning(**切片取样**)　从较大样件上切割下的大小合适且具有代表性的供金相检查用样品。切割方法包括剪、锯(使用弓锯、带锯和金刚丝锯)、砂轮切割和电火花加工。

segment die(**拼合模具**)　由几部分拼合而成的模具，以便于工件从中取出。*split die*(*组合模具*)的同义词。

segregation(**偏析**)　(1)合金元素、杂质或显微相在金属或合金中的不均匀分布。(2)合金元素在特定部位集中的一种铸件缺陷，通常是由于在一种相的初步晶体化后，其他元素就在留下的液体中汇集所造成的。显微偏析指的是在显微尺度上的正常偏析，其间作为一种合金元素较为富集的材料逐层地冷凝在枝晶上(核化)以及组分网格上。而宏观偏析指的是浓度上的显著差异(例如从铸件的一个区域到另一个区域)。也见*inverse segregation*(*反偏析*)和*normal segregation*(*正偏析*)。

segregation banding(**偏析带**)　合金元素在沿着与加工方向平行的流线或平板上的不均匀分布。

seizing(**卡咬**)　零件配合表面间的运动因过度摩擦而停止。

seizure(**咬合**)　由于界面间的摩擦而导致其相对运动的停止。咬合会伴随着明显的表面焊死。这个术语有时也用*scuffing*(*胶合*)表示。

Sejournet process(**塞儒内尔工艺、玻璃润滑剂高速挤压法**)　见*Ugine-Sejournet process*(*玻璃润滑剂高速挤压法*)。

selective heating(**选择性加热**)　有意只给工件的某些部位加热。

selective leaching(**选择性溶滤**)　从一种合金里只有一种元素能析出的腐蚀，而残留的元素(常为疏松的)在其特定的环境中具有更强的耐腐性。也叫去合金化(dealloying)或分离(parting)。也见*decarburization*(*脱碳*)、*decobaltification*(*除钴*)、*denickelification*(*除镍*)、*dezincification*(*除锌*)以及*graphitic corrosion*(*石墨腐蚀*)。

selective quenching(**局部淬火**)　仅对零件的局部进行淬火。

self-diffusion(**自行扩散**)　一个原子通过热激活运动到达其同类晶体里的一个新的地点，例如，铜晶体内的铜原子。

self-hardening steel(**自淬火钢**)　见优先选用术语*air-hardening steel*(*空气淬火钢*)。

self-lubricating material(**自润滑材料**)　任何不需要使用润滑剂就能表现为低摩擦的固体材料。

semiautomatic arc welding(**半自动电弧焊**)　配备了仅能控制钎料进给设备的电弧焊。比手动控制的要先进。

semiautomatic plating(**半自动电镀**)　电镀中所制备的阴极由机械传送通过电镀槽，间或用手动传送。

semiconductor(**半导体**)　一种固体晶体材料，其电阻率介于金属导体和绝缘固体之间，范围约为$10^{-3} \sim 10^{8}\Omega \cdot cm$，并与温度有密切的关系。

semifinisher(**半精轧模腔**)　一系列只是接近锻件最终尺寸的锻模的模腔。半精轧模腔常用于延长模具的寿命或精加工模腔，以此保证在锻造过程中对晶粒流动有适当的控制，并有助于满足尺寸公差的要求。

semifinishing(**半精加工**)　在精加工以前所进行的初始工序。

semiguided bend(**半导向弯曲**)　通过直接对试件需要弯曲的部分施加作用力使其弯曲。将试件夹住一端并用力使其围绕一根销轴或圆弧面进行弯曲；或者将试件靠近两端进行支撑，然后试件两个支撑点的背面与中点施加作用力使其弯曲。在某些情况，弯曲以这种方式开始，而以自由弯曲的方式结束。

semikilled steel(**半镇静钢**)　没有完全脱氧并含有足够的溶解氧，与碳发生反应生成一氧化碳，用于弥补凝固收缩的钢。

semipermanent mold(**半金属铸型**)　使用砂芯或石膏芯的金属铸型。

semisolid metal forming(**半固态金属成形**)　两步铸造/锻造工艺，钢坯在一个带有搅拌器的铸型里进行浇铸，通过连续搅拌将熔化的金属搅匀，从而使枝晶组织破碎成细颗粒状的球状组织。经过冷却钢坯储存待用。日后再将其压铸余料切除，然后加热至半固体状态再放入模具里进行锻造。正常情况下铸坯在30%~40%为液体的状态时进行锻造。也见*rheocasting*(*流变铸造*)。

sensitization(**敏感化**)　处于大约540~845℃(大约1000~1550℉)的温度下，奥氏体不锈钢里的碳化铬通常在晶界上产生沉淀，由此造成晶界贫铬，并

因此对一种由腐蚀性介质引起的择优侵蚀产生敏感性。焊接是敏感化的普通原因。在焊接热效应区，由碳化物引起的焊接衰变(敏感化)会导致晶粒间腐蚀。

sensitizing heat treatment(敏感化热处理)　作为热处理无论是偶尔的、有意的还是伴随的(如在焊接过程中的)，只要在晶界上产生组分析出，通常都会使合金对晶粒间腐蚀或晶粒间应力腐蚀开裂变得敏感化。也见 *sensitization(敏感化)*。

Sendzimir mill(森吉米尔轧机)　一种多辊型轧机，机上有小直径的工作轧辊和大直径的支承轧辊，支承轴承安装在偏心轴上，因此通过转动可以增加轴承和支承轧辊之间的压力。该轧机用于轧制精密和非常薄的薄板和带钢。

series welding(系列焊、单边多电极焊接)　同时进行两个或多个点焊、缝焊或凸焊的电阻焊，使用一个变压器，并由三个或多个的电极构成一个系列电路。

settling(沉降)　(1)固体仅仅由于重力效应而从其悬浮着的较低密度的流体中脱离出来。(2)在液态镁合金中，加入锰后可在低温下保持金属的熔化，并以此从中去除铁的一种工艺。

severity of quench(淬火急冷度)　淬火介质从热的钢工件吸取热量的能力，表达参数为：*Grossmann number(H)(格洛斯曼指数)*。

shadowing(TEM 覆形膜)　直接用碳或金属膜沉积在塑料的复制品上，然后用透射电子显微镜显示所要分析的重要特征。最常用于显示断口表面最大程度上的细节及其分辨率。

shakeout(出砂)　将铸件从砂型中取出。也见 *knock-out*(拆模，落模)。

shaker-hearth furnace(振底式炉)　一种连续式炉子，通过炉底的往复运动沿炉底移送零件。

shank　(1)(**固定耳**)。模具或工装上用于在锻压机或压力机上固定的部分。(2)(**手把**)。用于抬小钢包或坩埚的手把。(3)(**车刀刀体**)。车刀的刀体，如果刀头是插入型的，它就是支承刀头的部分。

shape memory alloys(形状记忆合金)　具有通过适当的热处理后能恢复一些过去曾确定过的形状和尺寸的能力的一类金属。

shaping(刨削)　利用单尖刀具加工平表面。工件夹持在台虎钳或夹具上，或直接夹在工作台上。滑枕夹持着刀具经过工件作直线往复运动。

shatter crack(由白点引起的发裂)　见 *flake(白点发裂)*。

shaving　(1)(**剃齿、刮削**)　作为一种精加工工序，通过刀头与表面之间的直线运动精密地去除一层薄薄的工件表面材料。(2)(**去毛刺**)。修整如冲压件、锻件和管件的一类零件，去除一些不规则的棱边或提高其精度。

shear　(1)(**剪力**)。指的是作用于物体的一种力，它能使同一物体中的两个紧密接触部分之间产生或趋向于产生在与其接触面相平行的方向上作相互滑移。(2)(**剪刀、剪床**)。通过两个锐利的、紧密接触的刃口的闭合运动，将金属或其他材料剪断的机器或工具，例如方剪和圆剪。(3)(**角度剪**)。在两个切削刃口如两条直刀片或在冲头切削刃口与下模切削刃口之间的倾斜，因此每次的剪切面积被缩小。这样可以减小所需的力，但增加了工作的行程长度。这种方法称为角度剪切。(4)(**剪切**)。剪切模或剪切刀片的切断作用，例如剪断线。

shear angle(剪切角)　在金属剪切中，其剪切平面与工件表面之间形成的夹角。

shear bands(剪切带)　(1)非常高的切应变带，在金属薄板的轧制中能观察到。在轧制中它们的形成与轧制平面约成35°角度，平行于横向方向。它们与晶粒方向无关，并以高应变率横过所轧制薄板的整个厚度。(2)金属中高度局部化的变形区，并能从中观察到非常高的应变率，就像因高速(100 ~ 3600m/s 或 330 ~ 11800ft)弹射冲击或爆炸断裂所造成的那样。

shear fracture(剪切断裂)　晶体材料的一种断裂模式，它是由优先沿着切应力方向的滑移平面作平移而引起的。

shear ledges(剪切脊线)　见 *radial marks(径向线痕)*。

shear lip(剪切唇)　沿断口表面边缘的一种窄而倾斜的脊痕。有时该术语也用于表示处于断口边缘上的一种窄而常为月牙形的纤维区域，其断口呈劈裂状，尽管这个纤维区与其余的断口表面同处于一个平面上。

shear modulus(*G*)(切变模量)　切应力与低于材料比例极限的切应力所相应的切应变之间的比值。通常是用扭转试验测定切变模量值。即所谓的刚性模量。

shear plane(剪切平面)　仅限在金属切削过程中沿其发生剪切的区域。它从切削刃延伸到工件表面。

shear strain(切应变)　角度变化的正切，其变化是由通过物体内一点的两条原本相互垂直的直线之间的作用力造成的。故也称为角度应变。

shear stress(切应力) (1)与力的作用平面相切的分应力。(2)当金属晶体内的平行平面间作相互滑移时，所存在的应力。

sheet(薄板) 一种金属的平轧产品，其最大厚度和最小宽度取决于金属的种类，且其宽厚比约大于50。一般来说，厚度小于6.5mm(¼in)的称为薄板，而厚度为6.5mm(¼in)及其以上的称为中厚板。

sheet forming(薄板成形) 通过拉深载荷使一张薄板发生三维形状的塑性变形，而薄板的厚度或表面特征不会有明显的改变。比较 *bulk forming(整体成形)*。

shelf roughness(搁置粗糙度) 在电镀的过程中，由于未溶固体在零件表面上的沉降而形成其朝向上表面的表面粗糙度。

shell (1)(**容器**)。中空的结构或容器。(2)(**深拉深制品**)。深拉成形的冲压件。(3)(**毛管**)。以直径稍小的挤压模块挤压钢坯所留下的金属套管。(4)(**壳型**)。在壳型造型中用硬砂层和热固性塑料或树脂在一个模型外面成形，并以其作为铸型使用。(5)(**拉管模套**)。用于制造无缝拉管的管状铸件。(6)(**冲孔锻件**)。冲有孔的锻件。

shell core(壳芯) 一种壳型模铸的砂芯。

shell hardness(壳形硬化) 一种表面硬化工艺，一种合适的钢工件经整体加热和淬火硬化后形成马氏体表层或壳体，它与工件的轮廓紧密吻合并围绕在主要以珠光体转变生成物为心部的外面。通过截面大小、钢淬透性和急冷度之间的适当权衡而得到的结果。

shelling(剥落) (1)在铁路工程中，用于描述早期相剥落的术语。(2)涂有磨料的砂布的损耗机理，其所有的磨料颗粒都从涂层上脱落下来，而磨料依靠的正是这一涂层才能固定在砂布的衬里上。

shell molding(壳型模铸) 一种翻砂工艺，使用热固树脂粘结型砂混料，再将其敷于预热至150～260℃(300～500℉)的金属模型上，最后形成一个其型腔与模型外形相当的坚固外壳。也称为 *Croning process(壳型铸造法)*。

shielded metal arc cutting(保护金属极电弧切割) 一种金属电弧切割工艺，利用经遮蔽保护的金属电极和基体电极之间的电弧将金属加热熔化，并进行分割。

shielded metal arc welding(保护金属极电弧焊接，SMAW) 一种金属电弧焊接工艺，利用经遮蔽保护的金属电极和工件之间的电弧将它们加热，并实现金属间的熔合。其遮蔽是通过电极涂层的分解而形成的。不需要施加压力，钎料由电极提供。也就是通常所说的粘附焊接。

shielding gas(保护气体) (1)用于在焊接过程中防止大气污染的保护性气体。(2)在热喷涂中射向其底金属的惰性气体，以此将等离子火焰和底金属笼罩起来，为了隔离大气使氧化降低到最低限度。

shift(错箱) 由于在造型时上、下箱未能对齐或芯子在型腔里未能对准而造成的一种铸件缺陷。

shim(垫片) 一片很薄的材料，用于垫在两个表面之间，以此得到合适的配合、调整或对中。

shimmy die(摆动模) 见 *flat edge trimmer(平缘切边机)*。

shock load(冲击载荷) 一个突然作用的外部载荷，造成应力的迅速形成，例如内燃机里的活塞加载。

shoe (1)(**导向块**)。在不同的弯曲工序中使用的金属块，为加工零件起到成形或支承的作用。(2)(**锻模座**)。砧座或锭块。

Shore hardness test(肖氏硬度试验) 同 *Scleroscope hardness test(肖氏硬度试验)*。

short-circuiting transfer(短路转移) 在消耗电极的电弧焊接中，一种与熔滴转移相类似的金属转移，只是在每一熔滴转移到焊接熔池的过程中，其熔滴之大足以使电弧发生瞬间短路。与 *globular transfer(熔滴转移)* 和 *spray transfer(喷洒转移)*。

shortness(松脆性) 金属的一种脆性的形式。定名为冷松脆性或热脆性，是为了表示其脆性发生的温度范围。

short transverse(高度方向) 见 *transverse*(原文如此，疑应为 *transverse direction*——译者注)。

shot (1)(**金属细粒**)。小的球状金属颗粒。(2)(**压铸**)。将熔化金属注射进入一个压铸模里。其金属的注射之快又如枪械的射击。

shotblasting(喷丸处理) 用金属细粒进行喷射，通常用于去除表面的粘积物或轧屑，而且比喷砂更快、效果更好。

shot peening(钢丸喷射硬化) 一种金属冷作硬化的方法，经过钢丸流在可控的条件下向外露表面层进行高速冲击，以此在其里面形成压应力。

shotting(金属细粒的生产) 将熔化金属以细流喷洒进入一水槽里，随即凝固成球状颗粒，以此生产金属细粒。

shrinkage(收缩) (1)在热锻后的冷却过程中的金属收缩。因此模具的型腔尺寸要按照收缩的精确比例放大，以便锻件收缩达到设计要求的尺寸和公差。

(2)见 *casting shrinkage*(铸件收缩)。

shrinkage cavity(缩孔) 由于冷却收缩而遗留在铸造金属里的孔穴。这种缩孔看上去呈一个个单独的或相互连接的形状不规则的孔穴。也见 *casting shrinkage*(铸件收缩)。

shrinkage cracks(收缩裂纹) 在完全凝固之前因收缩而使晶粒被拉断，因此在金属中形成的裂纹。也见 *hot tear*(热裂)。

shrinkage rule(缩尺) 为了补偿铸件在型模里的冷却凝固而发生的尺寸改变，而采用的一种带有放大刻度的测量用尺子。

shroud(长水口) 一种带有保护的耐熔材料衬里的金属液体输送系统，在连续铸造中，当熔化金属从钢包倒入浇口盘再进入铸型里时，以此防止发生二次氧化。

shut height(闭合高度) 对于一种金属压力机，当处于行程的下死点位置并调整好之后，从床身上面到滑块底面之间的距离。一般来说，这是模具能适合于正常使用的最大高度，这时还要把模板厚度考虑进去。也见 *bolster*(模板)。

side milling(侧铣) 用三面刃(圆周面刃和侧面刃)铣刀进行铣削。它们常常按轮廓进行刃磨，但应铲磨后面。

sieve(筛子) 一套按大小分级的标准丝网或筛网，用于对其网目大小或过筛的固体粉末或固体粒子的大小分布进行分级测定。

sieve analysis(过筛分析法) 一种确定颗粒大小分布的方法，通常用依次筛留在网目大小递减的一系列标准筛子中的每一个筛上的颗粒质量分数来表示。

sieve classification(过筛分级法) 使用一套分级的筛子对粉末按颗粒大小范围进行分级。也叫过筛分析。

sieve fraction(过筛粒度) 让过筛通过特定号数筛子的粉末样品，再过筛某一个筛目更细的特定号数的筛子，这样留在该筛子上面的部分就是过筛粒度。也见 *sieve analysis*(过筛分析法)。

sigma phase(σ相) 一种硬而脆的非磁性中间相，具有四方形的晶体结构，每一个晶格单元中含有30个原子，空间群，*P4/mnm*，形成于许多过渡元素的二元和三元合金中。在不同系统里，这种相的化学成分并不相同，通常呈现出大范围的均质性。具有第三种过渡元素的合金化通常会增大这种场均质性，并使其扩展且深入到三元截面。

sigma phase embrittlement(σ相脆化) 在长时间地处于约为560～980℃(1050～1800℉)温度的过程中，由于硬而脆的金属间σ相在晶界上的析出，会造成铁-铬合金(最主要的是奥氏体不锈钢)的脆化。σ相脆化会导致韧性和塑性的严重丧失，还能使脆性材料更易于发生晶间腐蚀。也见 *sensitization*(敏感化)。

siliconizing(硅化处理) 使硅扩散进入通常为低碳钢的固体金属，并且为了提高其耐腐性和耐磨性，需要在高温下进行。

silky fracture(丝光断裂) 一种金属断口，其断裂的金属表面具有细微的纹理，通常无光泽显示。具有韧而强的金属特征。对照 *crystalline fracture*(晶体断裂)和 *granular fracture*(粒状断裂)。

silver soldering(银软钎焊) 非优先选用术语，表示用银基钎料的钎焊。见优先选用术语 *furnace brazing*(炉热硬钎焊)、*induction brazing*(感应硬钎焊)和 *torch brazing*(焰炬加热硬钎焊)。

single-action press(单动压力机) 从一边提供压力的金属成形压力机。

single impulse welding(单脉冲焊接) 一种电阻焊工艺的变型，其点焊、凸焊或镦焊都是以单脉冲进行的。

single-point tool(单刃头刀具) 只有一个面和一个连续切削刃的切削刀具。

single-stand mill(单机座轧机) 一种轧机，在某个特定时刻，产品只与两个轧辊接触。对照 *tandem mill*(串列式轧机)。

single welded joint(单侧焊接) 焊缝只从一个侧面进行焊接的电弧焊或气焊。

sinkhead(补缩冒口) 同 *riser*(冒口)。

sinking (1)(刻模)。在模块中切削加工出所要求锻件模腔的工序。(2)见 *tube sinking*(减径拔管)。

sintered density(烧结密度) 烧结后物体的质量(重量)与其体积之比，用 g/cm^3 表示。

sintering(烧结) 通过加热使大量的粉末或坯块中的颗粒邻近表面都粘结或压实在一起。烧结能提高粉末坯块的强度，通常还能促成其致密化以及粉末化金属中的再结晶。也见 *liquid phase sintering*(液相烧结)和 *solid-state sintering*(固态烧结)。

size effect(尺寸效应) 一块金属的尺寸对于其力学和其他性能以及对制造变量，如锻件收缩和热处理的影响。一般来说，尺寸的增大会使力学性能有所下降。

sizing(精整加工) (1)为了方整、定形、平整，要不就是为了修整表面，使之符合特定的尺寸及公差

所需要进行的二次成形或挤压工序。也见 *restriking (矫形锻压)*。(2)有些打磨、拉削、精冲和剃削工序也被称为精整加工。(3)一种矫正管材圆度的精加工工序。(4)粉末冶金烧结零件经最终压制得到所要求的尺寸。

skelp(焊接管坯) 用于制造焊接管或管材的原始毛坯,最常用的是具有合适的宽度、厚度及边沿形状的带材毛坯。

skim gate(撇渣口) 在造型工艺中,所设计的一种浇口结构,用于防止炉渣和其他不需要的材料进入铸件型腔。

skimming(撇渣) 在浇注之前或期间,从熔化金属表面撇去脏物或炉渣。

skin(表皮) 并非像包覆或电镀那样粘结而成的一种薄外表层,它具有与其基体材料有所不同的成分、组织和其他特征。

skin lamination(表皮起层) 在平轧金属中,因辊轧使金属亚表层发生爆裂,从而造成的表面破裂。

skin pass(表皮光轧) 见 *temper rolling (硬化冷轧)*。

skiving (1)(**刮、削**)。刀具通过高度的剪削或滑移,从材料上去除薄层或薄片。(2)(**旋切**)。一种使用成形刀具的切削工序,当刀具沿旋转工件作切向进给时,其切削面以一定的角度使切削刃从工件的一端行进到另一端。

skull(熔渣硬皮) (1)在浇铸槽里的熔化金属被倒注完后,在其壁上所凝固的一层金属或铁渣。(2)由熔化钎料形成的未熔化残留物。

slab(扁坯) 一种扁形的金属锭坯轧制半成品,其宽度不小于250mm($10in^2$)、横截面积不小于$105cm^2$($16in^2$)。

slabbing mill(扁坯轧机) 生产扁坯的初轧机。

slab milling(平面铣) 见优先选用术语 *peripheral milling (圆周铣削)*。

slack quenching(断续淬火) 由于对于某种钢从奥氏体化温度淬火的冷却速度低于被淬火钢的临界冷却速度,以致造成钢的不完全硬化,故除了马氏体以外还形成一种或多种过渡生成物。

slag(熔渣) 在熔化、提炼和某些焊接工序(如见 *electroslag welding 电渣焊, ESW*)中,由助熔剂和非金属杂质互溶而成的非金属生成物。在炼钢工艺里,熔渣起到保护熔化金属和抽取杂质的作用。

slag inclusion(熔渣夹杂物) (1)夹裹在金属里面的熔渣和铁渣。(2)夹裹在焊接金属或焊接金属和基体金属之间的非金属固体材料。

slant fracture(倾斜断口) 一种金属断口,典型的平面应力断裂,其断开的平面与作用应力的轴线成一角度(通常约为45°)的倾斜。

slide(滑块) 金属成形压力机中的一个作往复运动的主要部件,安装在压力机机架的导轨里,冲头或上模就固定在它上面;有时也叫做 ram(锤头)。双动压力机的内滑块叫做压力机柱塞或上夹板滑块,而外滑块叫做防皱压板滑块。三动压力机里的第三个滑块叫做下滑块,液压机的滑块常叫做模板。

slime (1)(**矿泥**)。在矿石处理中见到的颗粒大小特别细的材料。(2)(**电解阳极泥**)。在电解液的阳极上面形成的一种金属和一些不溶性化合物的混合物。

slip(晶体滑移) 晶体的一部分相对另一部分沿一个确定的晶体方向所作的不可逆的剪切位移(转移),由此引起的塑性变形;通常都发生在晶体平面上。有时也叫滑移(glide)。

slip band(滑移带) 一组紧密地挤在一起的平行晶体滑移线,在光学显微镜下,看起来像一条线一样。也见 *slip line (晶体滑移线)*。

slip direction(滑移方向) 结晶体发生滑移时的方向。

slip flask(顶提式砂箱、滑脱砂箱) 一种带锥度的上砂箱,它以一个可移动的金属带使型砂固定位置。在合模后,使金属带折叠而将上砂箱取下可供再用。于是在浇铸时做成的砂型要加装一个护套作为其支承。

slip line(晶体滑移线) 在金属表面上可见的滑移平面迹线。这种迹线(通常)只有当表面在变形前经过抛光时,才能观察得到。通常用光学显微镜观察到的金属晶体是一集束的滑移线,即所谓的 *slip band (滑移带)*。

slip plane(滑移平面) 发生晶体滑移的结晶体平面。

slitting(纵向剪切) 在金属薄板上按单一线条切割或剪切带料,或按照指定的长度或轮廓线切割薄板或工件。

sliver(轧制毛刺) 一种由挤延出来的非常薄的金属飞边所构成的瑕疵,其飞边仅有一侧附在母体金属上,并在母体金属的表面被进行加工。

slot furnace(槽式炉) 一种用于批量生产的通用热处理炉,其工件通过一个槽口或开口进行装炉和出炉。

slotting(开槽) 在插床上用往复运动的刀具切割出的缝隙或沟槽,也可以用铣刀、拉刀或砂轮加工得到。

slow strain rate technique(低应变速率技术) 一种

用于评价对应力腐蚀开裂敏感度的实验技术。也就是试件在一定的试验条件下，控制在低应变速率内沿轴向进行拉伸直至失效，然后检查试件的应力腐蚀开裂的情况。

slug(锻坯) (1)用于放在模具里进行锻造或挤压的短金属料。(2)冲过孔的小块薄板材料。见 *blank*(*毛坯、半成品*)。

slugging(塞焊) 焊接以前或焊接过程中，在其接头中插入一片或多片的分隔材料，这样会造成焊接接头与设计、图样或技术要求不相符合。

slush casting(空心铸件) 使用低而大的熔化温度范围的合金常会铸造出一些中空的铸件。所要求的金属厚度一旦在铸型里凝固，剩下的金属液体就被浇注溢出。这已被认为是一种淘汰工艺。

smelting(熔化) 一种通过化学反应使一种有用的矿石变为液态金属的热过程。

smith forging(史密斯锻打) 见 *hand forge*(*smith forge*)(*手工锻打*)。

smut(粉状污物) 有时在经过酸洗、电镀或腐蚀的金属表面上，会留下的一种反应生成物。

snagging(毛坯清铲) (1)使用装有粗砂轮的手提式或悬挂式砂轮机，将粗重毛坯上的一些多余材料从工件上铲磨干净。(2)通过对铸件或锻件的粗略打磨去除其上面的一些多余材料，如浇口、冒口、飞边及披缝。

snake (1)(**矫形**)。热金属棒料在进入下一道轧制工序以前，先进行扭曲和弯曲的成形产品。(2)(**蛇形缺陷**)。中厚板的任何歪扭形的表面瑕疵，类似于蛇。(3)(**弯曲芯棒**)。在弯曲工序中，用于靠紧型材内壁的活动芯棒，以防止弯扁或折断。

snap flask(可拆式砂箱) 造型中用的一种角上用铰链连接的砂箱，因此可以在金属浇注前将其打开，并从铸型上卸下以便再次使用。

snap temper(急速回火) 一种预防性和临时性的应力消除处理，在高淬透性钢的淬火后立即进行，以防止由于按规定对其进行的较高温度回火被延迟而发生开裂。

S-N curve(S-N 曲线) 应力(S)对到达失效的循环周数(N)的曲线。应力可以为最大应力(S_{max})或交变应力的幅度(S_a)。其应力值通常为名义应力，即未经应力集中修正的。该曲线图表示在规定的平均应力(S_m)或应力比值(A 或 R)以及规定的残存概率条件下的 S-N 之间的关系。N 几乎总是用对数坐标，而 S 最常用的是线性坐标，但有时也用对数坐标。即所谓的 S-N 图。

soak cleaning(浸泡清洗) 浸泡清洗而无电解作用。

soaking(均温处理) 在金属热处理中，延长保持所选定温度的时间，以使组织和成分均匀化。也见 *homogenizing*(*均质化*)。

soft magnetic material(软磁材料) 一种在磁场的作用下易于磁化的铁磁合金，而且当磁场撤销时，其又能真正恢复到非磁性的状态；即一种具有高磁导率、低矫顽磁力以及低磁滞损耗的合金。

soft soldering(软钎焊) 见优先选用术语 *soldering*(*软钎焊*)。

soft temper(软回火) 同 *dead soft*(*极软化*)的回火。

solder(软钎料) 用于软钎焊，并具有不超过 450℃(840℉)液相线的钎料。

solderability(软钎焊可焊性) 一种表面被熔化软钎料湿润的相对容易程度及其速度。

solder embrittlement(软钎料的脆化) 一种金属的力学性能，由于软钎料沿其晶界的局部渗透而降低。

soldering(软钎焊) 一种将金属连接在一起的工艺，其特点是将连接的金属加热到低于基体金属固相线的某一合适温度，并使用一种液相线不超过 450℃(840℉)的金属钎料。熔化钎料借助于毛细管的作用分布到接合处紧密配合的表面上。也见 *solder*(*软钎料*)。

soldering flux(软钎焊助熔剂) 见 *flux*(*助熔剂*)。

soldering iron(软钎焊烙铁) 一种带有被内部或外部加热的烙铁头的软钎焊工具，通常用铜制成。

solid cutters(整体刀具) 用一种材料制成的单体型刀具，而不是用两种或两种以上的材料组合而成的刀具。

solidification(凝固) 液态通过冷却，并经由熔化温度或熔化范围而变成固态的变化。

solidification range(凝固范围) 液相线和固相线之间的温度。

solidification shrinkage(凝固收缩) 金属从凝固的开始到结束，其体积的减小。也见 *casting shrinkage*(*铸件收缩*)。

solidification shrinkage crack(凝固收缩裂纹) 通常在高温下由于金属铸件在凝固过程中产生的内(收缩)应力而形成的一种裂纹。也称为热裂。

solid lubricant(固体润滑剂) 任何作为粉末或薄膜用于表面的固体，以便在其相对运动时，起到保护表面不受破坏以及减少摩擦和磨损的作用。

solid metal embrittlement(固体金属脆化) 由于温度降到材料中的各种脆化物质的熔点以下，而在材料中发生脆化。也见 *liquid metal embrittlement*(*液体

金属脆化,LME)。

solid solution(固体溶质) 含有两种或更多种化学物质的一种单一的、固态的均质结晶相。

solid-state sintering(固态烧结) 坯块或疏松的粉末聚合体的一种烧结程序，在其过程中并不发生组分的熔化。对照 *liquid phase sintering*(*液相烧结*)。

solid-state welding(固态焊接) 一类焊接工艺，都是在几乎低于基体材料熔点的温度下将金属连接在一起，并不需加入硬钎焊的钎料。接头处是否加压力可视情况而定。其例子包括 *cold welding*(*冷焊*)、*diffusion welding*(*扩散焊接*)、*forge welding*(*锻造焊接*)、*hot pressure welding*(*热压焊接*)和 *roll welding*(*辊压焊接*)。

solidus(固相线) (1)当金属或合金变成完全固体的最高温度。(2)在相图中代表不同的成分组成，在冷却过程中停止冻结或在加热过程中开始熔化的温度点的轨迹。也见 *liquidus*(*液相线*)。

solute(溶质) 作为较少或微量的含量存在于液体溶液或固溶体中的组分；即能溶解在溶剂(或作为固溶体中的基本组分——译者注)中的组分。

solution heat treatment(溶体热处理) 将合金加热至一适当的温度并保持足够长的时间，造成一种或多种组分进入固溶体，然后以足够快的速度冷却使其留在溶体里。

solution potential(溶液电位) 仅有金属电极及其离子的半电池反应中的电极电位。

solvent(溶剂或溶媒) 以较多的或主要的含量存在于液体或固体中的组分。即能溶解溶质的组分。

solvus(溶解度曲线,已不用) 在相图或平衡图中，代表由不同成分组成的固相与其他固相的共存温度点的轨迹，即固体溶解度的极限值。

sorbite(obsolete)(索氏体,已不用) 通过调整钢的冷却速度或钢在硬化后的回火得到的一种由铁素体和渗碳体组成的细混合物。第一种类型是在显微镜下难以分别的、非常细的珠光体，第二种类型为回火马氏体。

sour gas(酸气,含硫气) 在碳氢储罐中含有的硫化氢和二氧化碳气氛。长时间暴露其中，会导致铁合金发生氢损坏、硫化物应力开裂和/或应力腐蚀开裂。

sow block(模具夹持器) 置于锻锤的铁砧与锻模之间经热处理的钢制部件，用于防止铁砧的过度磨损。它有时也用于夹持嵌入模。也叫砧盖。

space lattice(空间点阵、空间晶格) 一种在空间的具有规则的、周期性的点阵排列(晶格点阵)，它们代表原子在同类完美晶体中的定位。这个概念还可适当地延伸到晶体化合物及其他物质，这时的晶格常代表具有均匀一致的成分、排列和方位的一组原子的定位。

spade drill(平头钻) 见优先选用术语 *flat drill*(*平钻*)。

spalling(剥落) (1)片状颗粒从表面脱落。剥落一般都与滚动轴承的滚动元件和齿轮的齿有关，它通常是由于亚表层疲劳造成，而且比点蚀的范围更大。(2)表面和表面镀层的自发性的脱落、碎裂和剥离。(3)由于任何不适当的热处理或材料解离，所造成的碎屑状或片状脱落。

spangle(镀锌件上的锌结晶花) 一种具有特征性的结晶形式，锌热浸镀层以此形式在带钢上固化。

spark testing(火花试验) 一种按照化学成分给铁合金分类的方法，即将合金靠紧高速旋转的砂轮，再用肉眼对火花的样式或流线进行识别。

spatter(喷溅) 在电弧焊或气焊过程中有金属颗粒喷射出来。但是它们并不构成焊缝的一部分。

spatter loss(喷溅损耗) 由于喷溅造成的金属损耗。

specific energy(单位能耗) 在切削或磨削中，除去单位体积的材料所要消耗的能量或需要做的功。

specimen(试件) 试验用的物件，具有标准的尺寸和/或形状，可用于有损或无损试验。从每一单个样品上可以切割下一个或多个试件。

speed of travel(焊接行进速度) 在焊接过程中，焊缝沿其纵向轴线延伸的速度。通常按 m/s 或 in/min 进行测量。

speiss(含镍钴的砷锑化合物) 通过熔化如钴或铅的金属矿石而生成的金属砷化物和锑化物。

spheroidal graphite(球形石墨) 具有多晶体辐射状组织的球形石墨。这种组织可以通过，例如在熔化金属中加入铈或镁形成。也见 *ductile iron*(*塑性铁*)和 *nodular graphite*(*球状石墨*)。

spheroidite(球状渗碳体) 铁或合金的碳化物聚合体，基本上呈球状分散在整个铁素体的基体里。

spheroidized structure(球状组织) 由一种基体包含其他组分的球形颗粒而构成的显微组织。

spheroidizing(球化) 通过加热和冷却在钢中形成球状或球体形的碳。常用的球化方法有：①延长保持在稍低于 Ae_1 温度的时间。②通过加热和冷却使其在稍高于和稍低于 Ae_1 温度之间交变。③加热温度高于 Ae_1 或 Ae_3 温度，然后在炉里非常缓慢地冷却或让其保持在稍低于 Ae_1 的温度里。④从所有的碳化物刚刚溶解的最低温度以适当的速度冷却，以此

防止再次形成碳化物网格，然后再按照以上①②的方法加热（适用于含有碳化物网格的过共析体。）

spiegeleisen（spiegel）（镜铁、低锰铁、铁锰合金） 含有 $w(\mathrm{Mn})$ 为15%～30%的锰和4.5%～6.5%的碳的生铁。

spindle（主轴） （1）机床上安装刀具或砂轮的轴。（2）安装有经渗碳的轮子的金属轴。

spinning（旋压成形） 用力使旋转坯料同与之同轴转动的成形心轴相贴合，使之成形为一个无缝的中空金属零件。其典型的应用，还可利用带有钝头的圆形工具将平轧的金属板坯紧压心轴，然而其他的毛坯（主要为焊接管或无缝管）也可依此方法成形。有时以辊子作为工具压头使用。

spinodal structure（旋节组织） 一种由于成分的增加而形成细且均质的双相混合组织，在适当的热处理过程中，它在固溶体里波动。旋节组织相的成分各不相同，并且与其母相也不一样，但是它们具有与母相一样的晶体组织。

spline（花键） 在一根轴的表面上有一系列的纵向直形凸出的键条，与之配合的零件则应有相应键槽的孔，两者以此相互传递转动。

split die（组合模具） 由几个部分组成的模具，便于分开将工件取出。即所谓的分体模具。

split punch（组合凸模） 在粉末冶金成形压力机上使用的组合式或一整套的凸模，以便为不同的粉末填充高度和在两级或多级零件中不同的压实程度分开定位。也见 *stepped compact（分级压实坯块）*。

sponge（海绵金属） 以疏松状态为特征的一种金属形态，它是一种由于未经熔化就发生分解或还原而形成的化合物。这个词可用于铁、钛、锆、铀、钚以及铂族金属的一些形态。

sponge iron（海绵铁） 一种粘着、疏松的和基本上为纯铁的铁块，通过氧化铁（轧屑或铁矿）的固态还原得到。

spot drilling（钻中心孔） 在工件表面钻一个起始的凹孔，以其作为后续加工工序中心定位。

spotfacing（平头钻削） 使用一种以孔定位进行端面切削的刀具，加工出与刀具旋转轴线相垂直的平表面，或略低于工件表面。

spot weld（点焊焊点） 用于两个搭接构件之间或其上面的焊接，构件上的熔合可以起始于和发生于紧密接触的表面上，或者由一个构件的表面产生。其焊接横截面基本上是圆形的。

spot welding（点焊） 见 *arc spot weld（电弧点焊焊点）*和 *resistance spot welding（电阻点焊）*。

spray quenching（喷洒淬火） 一种利用喷嘴向工件喷洒水或其他液体的淬火工艺。其淬火率受控制于喷速和单位面积上单位冲击时间里所冲击的体积。

spray transfer（喷洒转移） 在消耗电极的电弧焊里，熔化了的金属钎料以很细的液滴喷过电弧而形成的一种金属转移。比较 *globular transfer（熔滴转移）*和 *short-circuiting transfer（短路转移）*。

springback（回弹） （1）经受应力作用之后，金属的弹性恢复。（2）金属经过成形工序之后趋于回到原来的形状或轮廓的程度。这种回弹通过过度弯曲或二次锻打整形得以补偿。（3）在闪焊、镦焊或压焊中，由对顶压力引起的焊机的变形。

spring temper（弹性回火） 一种非铁合金和某些铁合金回火，其特征为经过这种回火后的抗拉强度和硬度约达到作为特别弹性回火的全硬化程度的2/3。

sprue（直浇口） （1）连接浇口杯和横浇口之间的铸型通道，或当没有浇口杯时，熔化金属直接从该通道浇入。有时也称之为 *downsprue（垂直浇口）*或 *downgate（垂直内浇口）*。（2）有时也意指所有在铸件落砂后，从其上面去除的浇口、冒口、流道及类似的废料。

sputtering（溅射镀膜） 以高能粒子（离子）流轰击固体表面，并以此造成原子类的喷射。所喷发的材料可以作为沉积的来源。也见 *physical vapor deposition（物理气相沉积，PVD）*。

square drilling（方孔钻） 利用特殊结构的钻头加工方孔，钻头精确地靠着方孔导套或模板的周边一面旋转一面摆动。

squaring shear（剪板机） 用于剪切薄板或中厚板的机床，主要由上面一个固定刀板（通常装于机床后面）和另一个安装在前面可作往复运动的横梁上的刀板构成，横梁由侧身机架垂直导向。其棱角通常为90°。

squeeze casting（压铸） 一种对液态金属进行挤压的混合式工艺，液态金属由液压机挤压进入可永久使用的铸型。

stabilizing treatment（稳定化处理） （1）在加工达到最终尺寸以前，对铁质或非铁零件反复加热到或略超过其正火处理的温度，然后冷却到室温，以保证它在使用中的尺寸稳定性。（2）通常以冷处理实现经淬透的钢内残留奥氏体转变。（3）将经过固溶稳定化处理的奥氏体不锈钢加热到870～900℃（1600～1650℉）的温度，以使所有的碳，如TiC、NbC或TaC，都得以析出，以防日后因暴露在高温里而产生敏感性。

stack cutting(板垛切断)　中厚板的热切割，将其成垛排列后用单把刀进行切割。

stack molding(叠模法)　一种造型方法，它利用一个型箱的两面，一面作为下型而另一面作为上型。将这些相似的型箱都装配在一起构成多层型腔，这样所有的铸件都通过一个共同的浇口进行浇注。

staggered-tooth cutters(交错齿铣刀)　排屑槽呈背向螺旋线并交错排列的铣刀。

stainless steel(不锈钢)　凡以 w(Cr)至少为10.5%的铬作为其主要合金元素的钢。它们通常在潮湿环境中表现稳定。

staking(铆锁)　将两个零件永久地固定在一起，即以一个零件铆入另一个零件，使之在连接处产生塑性流动。

stamping(冲压)　表示金属薄板的压力加工的一般性使用术语。它包括落料、剪切、热或冷成形、拉伸、弯曲或压印。

stand(轧机机座)　轧机设备里包含一对轧辊的一个部件。从通常的意义上说，也是指从冷或热轧机的任何一次通过。也见 *rolling mills (轧钢机)*。

standard electrode potential(标准电极电位)　在一个以标准氢半电池的电位为零并以所有生成物及其反应的电极活性度为单位的刻度上，所表示的电极作用的可逆电位。

standard gold(标准金)　w(Cu)为10%的金铜合金，在美国作为一次性使用的法定货币。

standard reference material(标准参考材料)　成分和性能都经过公认的标准化机构或组织检定的参考材料。

starting sheet(始极片)　在电解精炼中，作为阴极使用的金属薄板。

state of strain(应变状态)　对于在均匀变形的某一个体积内或某一点的变形的总体表述。一般来说，这种表述要求已知应变的各独立分量。

state of stress(应力状态)　对于在均匀受力的某一个体积内或某一点的应力的总体表述。一般来说，这种表述要求已知应力的各独立分量。

state of fatigue(疲劳状态)　一个有时用于确定氢脆形式的术语，这时金属在小于屈服强度的恒定应力作用下产生自发断裂。在应力作用(或受力金属暴露于氢气之中)与裂纹的开始之间几乎总有一段延迟。更合适被称为 *hydrogen-induced delayed cracking (氢引发延迟开裂)*。

steadite(斯氏体,磷化物共晶体)　一种硬的铸铁结构化组分，由固溶体中含有磷和磷化铁(Fe_3P)的铁素体的二元共晶体所构成。共晶体由 w(P)为10.2%的磷和 w(Fe)为89.8%的铁组成。其熔化温度为1050℃(1920℉)。

Stead's brittleness(斯特德脆性)　导致粗大晶粒组织中发生穿晶断裂的一种脆性条件，而粗大晶粒组织是因为事先在约低于705℃(1300℉)温度里轧制的低碳钢薄板又经受长时间的退火而引起的。这种断裂常沿与轧制方向成45°的方向发生。

steam hammer(蒸汽锤)　一种落锤，其锤头的每次冲程都是靠双作用蒸汽气缸举起，而且传送给工件的能量是由锤头的速度、重量以及由蒸汽压力向下驱动安装在锤头上的上模来提供的。在每一次冲程中，所传递的能量都是可变的。

steam treatment(蒸汽处理)　一种烧结铁类零件在蒸汽中并在510℃和595℃(950～1100℉)之间的温度里进行的处理，这是为了在其外露的表面生成一层黑色氧化铁(四氧化三铁铁锈或氧化亚铁-三氧化二铁,FeO-Fe_2O_3)，以提高其硬度和耐磨性。

Steckel mill(斯特克尔轧机)　一种冷压延的轧机，它有两个工作轧辊和两个支承轧辊，而且都不是被驱动的。带钢由动力卷轴以一个方向从轧机中拉出，直至带钢可以由第二个动力转轴返回，如此反复轧制直到所要求的厚度。

steel(钢)　一种铁基合金，从铸造开始就能在一定的温度范围里进行锻造，它们含有锰，通常还有碳以及其他常见的合金元素。碳钢和低合金钢的 w(C)最高为2.0%，高合金钢的 w(C)约为2.5%。低合金钢和高合金钢的界线一般认为是在5%的金属合金元素。

可以说，钢与两类一般的“铁”的区别在于：处于高碳一端的铸铁和处于低碳一端的相对纯铁，例如工业纯铁(ingot iron)、碳酰铁(carbonyl iron)和电解铁(electrolytic iron)。某些含碳量特别低的钢里，其含锰量是主要的鉴别因素，钢中 w(Mn)通常最少为0.25%，而工业纯铁的含量则相当低。

step aging(分步时效)　金属以两个或更多个的温度分步进行时效，每次时效后不必冷却到室温。也见 *aging (时效)*，并比较 *interrupted aging (间断时效)* 和 *progressive aging (顺序时效)*。

stepped compact(分级压实坯块)　通过一级(两步)或多级(多步)的横截面突变的压实得到的粉末冶金坯块，通常利用组合冲模进行压制，每一级截面的冲制都采用不同的压力和压实速度。也见 *split punch (组合凸模)*。

stepped extrusion(**分步挤压**) 见 *extrusion*(*挤压加工*)。

step fracture(**阶梯形断口**) 劈裂形断口，其发生在许多相互平行的解理平面上。

stereoscopic micrographs(**立体显微照片**) 从不同角度拍取同一区域的一对显微照片(或断口照片)，当合适的放置并观察这两张照片时，就可以显现具有三维关系的断口组织。

sterling silver(**925 标准纯银**) 一种 $w(Ag)$ 至少为 92.5% 的银合金，其余的合金成分不作规定但通常为铜。这种合金可用于制成各种扁平的和空心的餐具以及各式首饰。

stick electrode(**涂敷焊条**) 是 *covered electrode*(*涂料焊条*)的工业用术语。

stick welding(**涂敷焊接**) 见优先选用术语 *shielded metal arc welding*(*保护金属极电弧焊接,SMAW*)。

sticker breaks(**粘结条痕**) 呈弧形盘旋状的破裂，通常靠近薄板或带钢的中部出现(带钢热处理缺陷——译者注)。

stiffness(**刚度**) (1)应力与应变之比，材料要产生一定大小的应变，其所要求的应力越大，也可以说它的刚性越大。(2)材料或形状抵御弹性变形的能力。对于一定的形状，刚度与弹性模量成正比。对于一定的材料，刚度随转动惯量的增加而增加，后者是由横截面尺寸计算得到。

stock(**毛坯**) 一般用于指以任何形式或形状提供的的金属，也可以指为制造零件所用的经成形、锻造甚至切削而成的单件金属。

stopoff(**防护涂层**) 一种用于涂于焊缝邻近区域的材料，其目的是为了防止在进行硬钎(铜)焊或软钎(锡)焊时，钎料延伸到这种材料所涂敷的地方。也见 *resist*(*保护膜*)。

stopper rod(**注塞杆**) 安装于底注式钢包里面的一种装置，用于控制经过其浇注系统进入铸型的液态金属的流量。注塞杆是由一根钢杆、耐熔护套和一个石墨塞头构成的。

stopping off (1)(**保护**)。作为一种保护而使用。(2)(**保护层**)。将金属(如铜)沉积在一些区域，以防在这些地方发生渗碳、脱碳或氮化。(3)(**补浇注**)。用液态金属将铸型中的空穴填满，并使熔化金属有些外溢。

stradle(**原文如此,疑应为 straddle——译者注**) **milling**(**双面铣、跨铣加工**) 用两把隔开一段要求距离的铣刀对工件的两个侧面同时进行铣削。

straightening(**矫直**) (1)任何通过弯曲、扭转或拉直的工序，矫正棒材、管材或类似的长形零件或型材的任何直度偏差。这种偏差可以表示为弯曲度(相对于直度的偏差)或单位长度上的百(千)分表的总读数(TIR)。(2)用于纠正一个锻件或一个锻件的两个不同截面的同轴度的精加工工序。也见 *roll straightening*(*轧辊矫直*)。

straight polarity(**直极**) 见优先选用术语 *direct current electrode negative*(*直流负极焊,DCEN*)。

strain(**应变**) 一个物体由力的作用而引起的在其尺寸或形状上的单位变化。从更广义上来看，这个术语也用于表示一个物体在变形或塑性流动的过程中，尺寸发生特征性变化的无量纲数值。也见 *engineering strain*(*工程应变*)和 *true strain*(*实际应变*)。

strain-age embrittlement(**应变时效的脆化**) 在低碳钢(尤其是沸腾钢或加盖钢)塑性变形后再进行时效的过程中，伴随着其硬度和强度的增加而引起的塑性降低。其脆化的程度是时效时间及温度的函数，发生在 200℃(400℉)的温度中只需数分钟的事情，在室温里却要经过几个小时到一年的时间。

strain aging(**应变时效**) (1)塑性变形后的时效。(2)当经冷变形加工的金属或合金经过一段时间放置后，其塑性、硬度、屈服点以及抗拉强度所产生的变化。对于钢而言，其应变时效是以塑性的降低和硬度、屈服点和抗拉强度的相应增加为特征的。

strain energy(**应变能量**) 由于弹性变形而储存于物体里的潜能，等于为产生这种变形必须对其做的功。

strain hardening(**应变硬化**) 由在低于重结晶范围温度下的塑性变形所引起的硬度和强度的提高。即所谓的冷作硬化。

strain-hardening coefficient(**应变硬化系数**) 见 strain-hardening exponent(应变硬化指数)。

strain-hardening exponent(**应变硬化指数**) n 在下列关系式中的数值：

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

式中，σ 为实际应力；ε 为实际应变；K 为强度系数，它等于实际应变为 1 时的实际应力。应变硬化指数也叫“n-值”，它等于直到最大载荷画在 log-log 坐标上的实际应力/实际应变曲线的斜率，n-值关系到薄板材料在金属加工工序里被进行拉伸的能力。n 值越高，其成形性(拉伸性)也越好。

strain rate(**应变率**) 作为一般的拉伸试验发生应变的时间速率。可以按试件上的标距直接测量应变，

再以此进行计算得到其应变率。因为应变是无量纲的，所以应变率的单位为时间的倒数。

strain-rate sensitivity(*m*-value)(应变率敏感度,*m*) 在一个给定的塑性应变(ε)水平和给定的温度(T)条件下，为造成塑性应变率($\dot{\varepsilon}$)达到一定的增加量时所需要的应力(σ)的增加量。

$$m=\left[\frac{\Delta\log\sigma}{\Delta\log\dot{\varepsilon}}\right]_{\varepsilon T}$$

strain rod(应变杆) (1)在C形单柱金属成形压力机上，有时用于减少机身变形的圆棒。(2)在金属成形压力机的机身中，用于测量其弹性应变以及应力的圆棒。

strain state(应变状态) 见 state of strain(应变状态)。

strand casting(连续铸造) 用于表示进行诸如加长型的小锭、大锭或扁锭的单线或多线连续铸造的普通使用术语，如果是双线或多线铸型的连续铸造，则它们常具有一致的横截面。

stranded electrode(绞合焊条) 一种复合型焊条，由绞合金属线构成，在其外面封裹的材料起到改进性能、稳定化或提供保护的作用。

stray current(杂散电流) (1)不是在回路里需要流经的电流。(2)在电镀中以杂乱无章的、不符合要求的双电极方式流动的电流，这种双电极可能就是电解槽本身或低劣的联结电极。

stray-current corrosion(杂散电流腐蚀) 不是在指定的回路里流经的直流电流所造成的腐蚀。例如在泥土里的寄生电流。

stress(应力) 当物体在外力的作用时，会发生体积和形状的变化，为阻止这种变化，在其内部分布的力或分力的强度。应力用单位面积上的力表示。应力可以是法向的(拉伸或压缩)或切向的。也见 *compressive stress(压应力)*、*engineering stress(工程应力)*、*mean stress(平均应力)*、*nominal stress(名义应力)*、*normal stress(法向应力)*、*residual stress(残余应力)*、*shear stress(切应力)*、*tensile stress(拉应力)*和 *true stress(实际应力)*。

stress amplitude(应力幅度) 重复变化应力中一个循环的最大和最小应力的代数差值的一半。

stress concentration(应力集中) 在宏观力学的水平上，在缺口、孔穴、空洞或夹杂物处的作用应力水平的放大倍数。

stress concentration factor(K_t)(应力集中系数) 将该系数乘以作用应力，以此反映如缺口或空洞等组织缺陷的存在，故 K_t 等于缺陷区域的最大应力与整个截面上的名义应力之比。它也叫理论应力集中系数。

stress corrosion(应力腐蚀) 由于在腐蚀环境中的应力作用，相关部位所发生的选择性侵蚀。若单有一种环境情况，在这些地方是不会发生腐蚀的。

stress-corrosion cracking(应力腐蚀开裂,SCC) 要有腐蚀剂和持续不断拉应力的同时作用，才会发生的裂纹开裂。它不包括由于腐蚀使截面缩减而造成的快速断裂损坏，也不包括晶间和穿晶腐蚀，这些腐蚀没有作用应力或残余应力也会引起合金的崩裂。应力腐蚀开裂可以与氢脆结合起来发生。

stress-intensity factor(应力强度因数) 这是一个比例因数，一般用符号 K 代表，在线性弹性断裂力学中用于表述已知大小和形状的裂纹尖端处的作用应力强化。在含有裂纹的任何组织里，裂纹快速扩张起始时的这个因子就称为临界应力强度因数或断裂韧度。不同的下标用于代表不同的加载状态或断裂韧度：

K_c	平面应力断裂韧度，是一种裂纹加速扩张时的应力强度值，它所发生的截面小于经常发生平面应变状态的截面
K_I	应力强度因子，表示一种使裂纹的开裂面沿其裂纹平面的法向方向延伸的加载状态(即所谓变形的开口模式)
K_{Ic}	平面应变断裂韧度，对于任何给定的材料及其状态的 K_c 最小值
K_{Id}	动力断裂韧度，在动态加载状态下确定的断裂韧度，它作为非常韧性材料的 K_{Ic} 近似值使用
K_{Iscc}	应力腐蚀开裂的应力强度因子门槛值。在规定状态下，应力腐蚀开裂起始时的临界平面应变应力强度
K_q	平面应变断裂韧度的暂定值
K_{th}	应力腐蚀开裂的应力强度门槛值。在规定状态下，应力腐蚀开裂起始时的临界应力强度
ΔK	在一个疲劳周期里应力强度因子的范围。也见 *fatigue crack growth rate*(da/dN)(疲劳裂纹扩展率)

stress-intensity factor range(ΔK)(应力强度因数范围) 在疲劳的一个循环过程中应力强度因子的变化，也即 $K_{max}-K_{min}$。也见 *fatigue crack growth rate* (da/dN)(*疲劳裂纹扩展率*)。

stress raisers(应力集中源) 一些设计特征(如尖锐的凹角)或机械缺陷(如缺口),它们会引起这些地方的应力强化。

stress range(应力范围) 见 *range of stress*(S_r)(*应力范围*)。

stress ratio(A 或 R)(应力比) 在一个应力循环中,两个规定应力值的代数比值。两个普通使用的应力比为:①交变应力幅值与平均应力之比,$A = S_a / S_m$;②最小应力与最大应力之比,$R = S_{min}/S_{max}$。

stress relaxation(应力消减) 在保持不变的温度及恒定的约束下,固体中的应力随时间消减。

stress-relaxation curve(应力消减曲线) 一种将应力的维持和消减作为时间的函数而绘制的曲线。消减的应力等于原始应力减去剩余应力。即所谓的应力-时间曲线。

stress-relief cracking(应力消除开裂) 为了减小残余应力、提高韧性或适应在高温中使用,在焊接后的热处理过程中,将焊接件置于高温中处理时,在其热效应区或焊缝处所发生的开裂。

stress-relief heat treatment(应力消除热处理) 对一结构件或其中一部分进行均匀的加热,并使其达到足够高的温度,以此消除大部分的残余应力,随后再均匀冷却。

stress relieving(应力消除) 加热至适当的温度,并保持足够长的时间以减小其残余应力,然后尽可能缓慢地冷却,使新产生的残余应力为最小。

stress-rupture strength(应力断裂强度) 见 *creep-rupture strength*(*蠕变断裂强度*)。

stress-rupture test(应力断裂试验) 见 *creep-rupture test*(*蠕变断裂试验*)。

stress state(应力状态) 见 *state of stress*(*应力状态*)。

stress-strain curve(应力-应变曲线) 通过拉伸、压缩或扭转试验所得到的相应应力值和应变值,并相互对应画出其曲线。应力值通常为垂直坐标(纵坐标、y-轴),而应变值为水平坐标(横坐标、x-轴)。即所谓的变形曲线和应力-应变图。

stretcher leveling(拉伸矫平) 通过夹住一张金属薄板的两头并进行拉伸,使其承受高于其屈服强度的应力,以此对其进行矫平(即消除它的翘曲和扭曲)。

stretcher straightening(拉伸矫直) 一种圆棒、管材和型材的矫直工艺,它是通过从坯料的两端进行拉伸达进行的。材料被延伸到一定的量,以此消除其翘曲。

stretcher strains(拉伸应变) 经过刚刚超过屈服点的变形后,在某些薄板材料的表面上显示出被延长了的记号。这些记号基本上与最大切应力的方向相平行,并且也是局部化屈服的结果。也见 *lüders lines*(*吕德斯线*)。

stretch former(拉伸成形机) (1)一种用于进行拉伸成形工序的机器。(2)一种在传统压力机上配套使用的装置,用于完成拉伸成形。

stretch forming(拉伸成形) 使金属薄板或零件成形,通常都有均匀一致的横截面,首先对其进行适当的拉伸或拉延,然后将其卷绕在具有要求形状的模具上。

stretching(拉伸) 金属薄板在所有各个方向上的拉伸。在拉伸过程中,应将平板毛坯的边缘可靠地夹住,从一开始就将变形局限在下模的范围之内。拉伸极限就是金属失效的开始。

striation(条纹) 一种疲劳断口的特征,常由电子显微镜观察到,它表示完成每一轮应力循环后裂纹前沿的位置。而条纹间的距离则表示在一个应力循环过程中裂纹前沿跨越晶体的前进跨距,垂直于条纹的直线表示的是局部条纹扩展的方向。也见 *beach marks*(*沙滩纹路*)。

strike(底板镀层) (1)一种很薄的金属电镀镀膜,在其上面还罩覆着其他镀层。(2)一种具有高覆盖能力和低效的电镀溶液,其用途是为了电镀一层薄的金属粘附膜。

striking(电镀) 一种在特殊条件下的电镀,即非常薄的金属镀膜,以此便于再用其他金属或同种金属在不同的条件下进一步电镀。

striking surface(闭合表面) 在一套金属成形模的模面上,当上下模闭合在一起时相接触的部分。这个闭合表面有助于保护型腔不受冲撞,还有利于保持模具较长的寿命。

stringer(纤维状夹杂物) 在锻压材料中,按加工方向被延伸后的显微组分或外来夹杂物。它通常与钢中所含的经过延伸的氧化物或硫化物夹杂有关系。

stringer bead(窄焊道、直线焊道) 一种连续的、不作适度横向摆动(横摆运动)焊接而成的焊道。对照 *weave bead*(*横摆焊道*)。

strip (1)(**带钢**)。一种扁轧的金属制品,其最大厚度和宽度人为地规定为与其金属的种类有关,比薄板要窄。(2)(**辊轧坯块**)。一种通过辊压而成的粉末冶金产品。也见 *roll compacting*(*辊轧压实*)。(3)(**脱模**)。将粉末冶金坯块退出模具。以此替代顶模或拆模。

stripper(漏模板) 在退料的操作过程中,用于将带

材、薄板的金属毛坯从冲压机构中退出来的金属板。模板也可在精密模具里作为小的高精度冲头的导向使用，将废料从模具中导向排出并帮助进行剪切。模板分为固定的和可移动的两种。

stripper punch(脱模冲头,顶件) 作为一种冲头，能在金属成形模中起到模顶或模底的作用，接着再进入模具将零件或坯块顶出来。也见 *ejector rod (顶杆)* 和 *knockout(3)(拆模)*。

stripping (1)(**剥离涂层**)。将涂层从表面去除。(2)(**脱模**)。将造型用的模型从铸型中取出或将芯盒从砂芯上卸下。

structural shape(建筑型材) 被钢铁工业的建材部门作为标准采纳的各种金属型材型号。

structure(晶体组织) 用于表示结晶体中的一个单位晶体的形状和大小，以及所有的原子在其里面的位置。作为显微组织，指的是相的大小、形状和排列。也见 *unit cell (晶胞)*。

stud arc welding (电弧螺柱焊) 利用两个螺柱或与之类似的零件和其他工件之间的电弧加热，使金属实现连接的一种电弧焊。当连接表面经适当加热后，就用压力将它们压在一起。使用围绕在螺柱外面的陶瓷箍形成部分保护。是否用气体或助熔剂进行保护可视情况而定。

stud welding(螺柱焊) 一般指将金属螺柱或与之类似的零件连接在工件之上的焊接。这种焊接适宜用电弧焊、电阻焊、摩擦焊或其他工艺，外加气体保护则可视情况选用。

styrofoam pattern(发泡聚苯乙烯模型) 一种泡沫塑料的消耗性模型，尤其是在采用失泡工艺的铸件生产中所使用的发泡聚苯乙烯。也见 *lost foam casting (失泡铸造)*。

subboundary structure(subgrain structure)(小晶粒间界、亚晶界) 一种低角度的晶界网络，通常其显微组织的主晶粒内部只有不到1°的定向误差。

subcritical annealing(亚临界退火) 一种把钢加热到低于 A_1 温度，然后缓慢冷却到室温的退火处理。也见 *transformation temperature (相变温度)*。

subgrain(亚晶粒) 一个晶体或晶粒的一部分，它的方向略微不同于其同一晶体邻近部分的方向。

submerged arc welding(埋弧焊,SAW) 一种电弧焊工艺，它是通过一根裸体金属焊条或多根焊条与一些工件之间一道或多道电弧的加热实现金属间的连接的。其电弧和熔化金属都是用工件表面上的颗粒状的易熔材料覆盖层加以保护的。连接金属间不用施加压力，钎料是从焊条中获得，有时也来自于辅助性来源(即焊条、熔剂或金属颗粒)。

submerged-electrode furnace(浸极式炉、一种液体渗碳炉) 一种将零件用液体渗碳的炉子，其浸没式的电极加热是在以陶瓷衬里的熔化盐浴槽中进行的。也见 *immersed-electrode furnace (浸极式炉)*。

subsieve fraction(亚筛粒度) 能通过 44μm(325 目)筛面的颗粒。

subsieve size (亚筛颗粒大小) 见优先选用术语 *subsieve fraction (亚筛粒度)*。

substitutional element(替代元素) 一种其原子的大小及其他特征都与溶剂相似的合金元素，可用于在晶格中更换或替代溶剂原子，并在相图中形成固溶体的有效部分。

substitutional solid solution(替代固溶体) 一种其溶剂和溶质原子都在固溶体晶体组织的原子位置上随机地占位的固溶体。也见 *interstitial solid solution*(间隙固溶体)。

substrate(涂层基体) 用涂层涂敷的材料、工件或物体。

substructure(亚晶组织) 同 *subboundary structure (subgrain structure) (小晶粒间界、亚晶界)*。

subsurface corrosion(亚表层腐蚀) 在金属表层下生成隔离性颗粒的腐蚀物。这是由于某些合金组分与扩散到内部的氧、氮或硫所发生的选择性反应所致。

sulfidation(硫化作用) 一种金属或合金与含硫类物质发生的反应，并且在金属或合金的表面或亚表层生成硫化合物。

sulfide stress cracking(硫化应力开裂,SSC) 由于水和硫化氢的存在，在拉应力和腐蚀的共同作用下因开裂而造成的脆性断裂。也见 *environmental cracking (环境开裂)*。

sulfur dome(硫罩) 一种翻转的容器，里面充满高浓度的二氧化硫气体，用于压力铸造中笼罩在熔化镁的熔槽上，以防止其发生燃烧。

sulfur print(硫印、硫黄检验法) 一种用于检查硫化物夹杂分布的宏观照相方法，即将一张经过酸化的湿照相纸贴在经抛光的被检查的薄板表面。

superabrasives(超细研磨磨料) 人造金刚石和立方氮化硼(CBN)，广泛应用于在各种切削和磨削的用途中。

superalloys(超合金) 以镍、铁-镍或钴为主要合金元素的耐热合金，具有高温下的高强度和抗表面劣变的性能。

superconductivity(超导性) 许多金属、合金、化合

物、氧化物和有机物在温度接近 0K 时所具有的性质，它们的电阻因此消失并且变成强抗磁体。

supercooling（超低温冷却） 物质被冷却到其状态通常应当发生状态变化，而并未发生这种状态变化的温度，例如一种液体冷却到它的冰点以下却没有发生冻结，于是处于一种亚稳态的状态。

superficial hardness test（表面硬度试验） 见 *Rockwell superficial hardness test（洛氏表面硬度试验）*。

superfines（超细粉末） 颗粒大小小于特定值，即通常为 10μm 的金属粉末。

superfinishing（超精研） 一种非常类似于珩磨的低速研磨工艺，然而又不像珩磨，超精研工艺主要为了降低表面粗糙度，而很少是为了提高几何精度（尺寸精度）。即所谓的微珩磨。

superheating（超高温加热） （1）物质被加热到其状态通常应发生状态变化，而并未发生这种状态变化的温度，例如一种液体加热到它的沸点以上却没有发生沸腾，于是处于一种亚稳态的状态。（2）金属熔点以上任何温度的增量，有时将其看成正常铸造温度以上的任何温度进一步提高，其目的在于精炼、合金化或提高流动性。

superlattice（超晶格点阵结构） 见 *ordered structure（有序结构）*。

superplastic forming（超塑成形，SPF） 一种对应变速率敏感的金属薄板成形工艺，它利用了材料的高拉伸塑性的特性。在超塑成形的过程中，以气体压力作用于超塑性薄板，就可以使材料按照模型的轮廓成形。也见 *superplasticity（超塑性）*。

superplasticity（超塑性） 某些金属（最常见的是铝和钛基合金）能在高温下和变形速率受控的条件下形成极高的拉伸塑性的能力。

supersaturated（过饱和的） 一种亚稳态的溶体，它里面溶解的材料超过其溶剂在一般温度及其他条件下达到正常平衡时所能容纳的数量。

support pins（支撑销） 一根具有精确长度的圆棒或销，在金属成形压力机中，用于支撑形状不规则的凸模上的悬臂部分。

support plate（支撑板） 在金属薄板成形压力机中，用于支撑拉环或拉板。它还能起垫板的作用。也见 *draw plate（拉板）* 和 *draw ring（拉延环）*。

surface alterations（表面改变） 材料表面由于切削或磨削而发生的凹凸不平和各种改变。与金属的加工工艺有关的表面改变种类包括机械的（如塑性变形、硬度变化、裂纹等）、冶金的（如相转变、孪晶作用、重结晶以及未回火和过回火的马氏体）、化学的（如晶间侵蚀、脆化及点蚀）、热的（热效应区、重铸或重析出金属以及重凝固材料）和表面电学改变（导电性变化或电阻加热性）。

surface checking（表面微裂纹） 同 *checks（细裂纹）*。

surface damage（表面损坏） 根据摩擦学，固体表面的损坏是由于它与另一个跟它做相对运动的物体、表面或几个表面的机械接触所造成的，也就是其表面材料的移位或损耗。在某些文章里，磨损是一种材料被逐渐损耗的表面损坏形式。在另一些文章里，表面损坏则指的是固体表面功能的退化，即使表面并没有发生材料损耗。或许发生在磨损之前就已经有表面损坏了。

surface finish（表面粗糙度） （1）固体材料表面的几何不平度。表面粗糙度测量不包含固有的结构性不平度（指表面波纹度或形状误差——译者注），除非它们也属于被测量的特征。（2）由最终处理而形成的表面状态。

surface grinding（表面磨削） 通过磨削产生表面。

surface hardening（表面硬化） 适用于铁合金的多种工艺的一般性使用术语，它仅指利用淬火硬化产生的表面层，该表面层的硬度或耐磨性超过其心部。表面层的化学成分没有任何明显的改变。常用的这些工艺有碳氮共渗、渗碳、感应淬火、火焰淬火、氮化和氮碳共渗。最好还是使用这些特定的工艺名称。

surface modification（表面改性） 通过能束或粒子束使表面的成分或组织发生变化。普通使用的两种表面改性方法为表面的离子注入和激光处理。

surface roughness（表面粗糙度） 材料表面纹理上的微小凹凸体，通常包括因加工工艺所固有的作用而形成的微凸体。表面粗糙度常用算术粗糙度平均值 *Ra* 表示，单位为 μm 或 μin。

surface texture（表面织构） 与表面有关的粗糙度、波形、加工纹理以及毛刺。也见 *lay（加工纹理）*。

surfacing（堆焊） 钎料金属（材料）在基体金属（底料）上的堆焊，以期获得所需要的性质或尺寸，这与通过焊接进行连接不一样。也见 *buildup（熔敷）*、*buttering（涂镀）*、*cladding（包覆层）*、*coating（涂层）* 和 *hardfacing（表面硬化、表面耐磨堆焊）*。

surface weld（堆焊） 一种在无断裂的表面上由一条或多条直形的或摆动的焊道组成的焊接，以此获得所需要的性质或尺寸。

swage （1）（**旋锻**）。通过旋转模的快速打击使毛坯的横截面积缩小和改变的工序。（2）（**挤细**）。利用锥孔模以锻打、锤击或挤压的方法，使棒材、圆

杆、线材或管材的截面减小的工序，即将其沿长度方向逐渐使材料的全部截面都减小到与锥孔的小端尺寸一样。

swaging(挤细) 利用锥孔模以锻打、锤击或挤压的方法，使棒材、圆杆、线材或管材的截面减小的工序，即将其沿长度方向逐渐使材料的全部截面都减小到与锥孔的小端尺寸一样。也见 *rotary swager(回转模锻机)*。

swarf(细铁屑) 在磨削中形成的，由磨屑和磨料、粘结剂的细颗粒紧密构成的混合物。

sweat soldering(热熔焊接) 软钎焊的一种，将经过软钎焊料预涂的两个或多个零件再次加热并装配，使之连接在一起，不需要另用钎料。

sweep(刮板) 翻砂造型用的一种模型，它是一块轮廓按铸型形状割成的模板，将其绕一个桩柱或转轴旋转就能形成铸型的形状。

Swift cup test(斯维夫特深杯拉伸试验) 一种确定金属薄板成形能力的模拟试验，将不同直径的圆形毛坯夹在环形的模具里，用一个平底的圆柱形冲头把毛坯深拉成一个杯子形状。能够成功地拉成杯形的最大毛坯直径与杯形直径之比就是所谓的极限拉伸比(LDR)或变形极限。

swing forging machine(摆锻机) 借助于由曲柄机构驱动的摆动式对模，将钢锭、初轧坯或方坯连续热轧成为扁钢、圆钢或方钢。

swing frame grinder(悬挂式砂轮机) 用链条挂在框架中心的砂轮机。因而它可以向任何方向转动和摆动，以此对方坯、大型铸件或其他重型工件进行打磨。主要的用途是去除表面的缺陷和粗糙部分。

synthetic cold-rolled sheet(伪冷轧薄板) 一种酸洗的热轧薄板，通过充分的最终回火使其表面接近冷轧钢。

T

tacking(定位点焊) 进行定位点焊。

tack weld(定位点焊) 在零件进行最后的焊接以前，将焊接的零件放置准确并进行临时性的点焊，以固定位置。

tailings(尾矿) 在选矿富集的过程中，粉碎矿石中的废矿石部分。

tandem mill(串列式轧机) 由两个或多个机座构成的轧机线，而且按其排列所轧制的金属沿直线从一台行进到下一台机座。在连续辊轧的过程中，不同的轧机机座保持同步，故带钢能在所有的基座里同时进行轧制。与 *single-stand mill(单机座轧机)* 相反。也见 *rolling mills(轧钢机)*。

tandem welding(串联多弧焊) 有两个或多个电极的电弧焊，这些电极都处于与其行进路线相平行的平面上。

tangent bending(切向弯曲) 在单一工序里，擦着金属薄板使其绕着一个或多个圆角模进行一个或多个绕平行轴线且相互一致的弯曲成形。薄板可以有侧面镶边并将其夹在圆角模上，然后以一个摇板模用力将薄板压在圆角模上，并擦着薄板使之沿圆周移动，以此得到与其圆角半径相符的弯曲圆弧。也见 *wiper forming(wiping)(回转弯曲成形)*。

tap(丝锥) 一种圆柱形或圆锥形的螺纹切削工具，在其圆周上有一个或多个与所要求的螺齿形状相同的切削刃口。螺端刃口通过旋转和轴向两种运动的合成切削出内螺纹，丝锥从它正在加工的螺纹得到主要支撑。

tap density(摇实密度) 粉末的表观密度，它是在规定条件下将粉末装入容积储罐时，通过拍打或摇晃后得到的密度。

tapping (1)(**攻螺纹**)。用一种圆柱形的加工内螺纹的切削工具，工具的圆周上有两个或多个形状、尺寸与所切的螺齿相同的切削刃口。丝锥的端部刃口通过旋转和轴向两种运动的合成切削螺纹，丝锥主要靠它正在加工的螺纹获得支撑。也见 *tap(丝锥)*。(2)(**开炉**)。打开熔化炉的出口使熔化金属流出。(3)(**出炉**)。让熔化金属从炉里流出。

tarnish(无光泽、表面变色) 金属表面的失色，这是由于表面生成了腐蚀物薄膜。

teapot ladle(茶壶形钢包) 一种钢包，其熔化金属通过一个外出口从底部而不是顶部流出。

teeming(浇铸) 将熔化金属从钢包倒入铸锭的铸型里。这个术语特指将钢液或铁液倒入铸锭的铸型里。

temper(回火) (1)在热处理中，为了降低一些硬度和提高韧性，将硬化钢或硬化铸铁加热至共析点以下的某一温度。这种工艺有时也应用于正火钢。(2)工具钢有时也要用回火，但是并非要特意指明其含碳量。(3)对于非铁合金及某些铁合金(一些不能用热处理进行硬化的钢)，其硬度和强度是通过机械处理、热处理或两者一起处理而形成的，并且其特征表现为一定的组织、力学性能或经冷变形加工的面积收缩。(4)用水对用于造型的生砂进行湿润。

temper brittleness(回火脆性) 见 *temper embrittlement(回火脆化)*。

temper carbon（**回火碳**）　团形的细微石墨，就像在锻铁中可见到的，它是由于渗碳体的分解而形成的，例如将白口铸铁加热到铁素体-奥氏体的相变温度以上，并保持一段相当长的时间。即所谓的退火碳。

temper color（**回火色**）　一种很薄的并紧紧粘附的氧化皮（仅仅几个分子厚），它是钢在低温下回火，或短时间地处于空气里或一种较弱的氧化气氛中形成的。其颜色根据氧化皮的厚度从草黄色到蓝色，而且随时间和温度而变。

tempered layer（**回火层**）　钢的试件在金相制备过程（通常为磨削）中，由于加热回火到一定阶段而在其上面形成的表层或亚表层。当对经腐蚀的金相磨片进行观察时，回火层显得比基体材料更暗一些。

tempered martensite（**回火马氏体**）　当加热马氏体到低于铁素体-奥氏体相变温度时所生成的分解产物。

tempered martensite embrittlement（**回火马氏体脆化**）　高强度合金钢在205～370℃（400～700℉）的温度范围里回火形成的脆化。也叫350℃或500℉脆化。回火马氏体脆化被认为是因为渗碳体在前期奥氏体晶粒边界上或板条间边界上的析出和杂质在前期奥氏体晶粒边界上的偏析两者的共同影响所致。它不同于由材料强度及处理的温度范围所引起的回火脆化。在回火脆化中，通常钢在相对较高的温度中回火，形成较低的强度和硬度，而在回火之后的缓慢冷却以及在其脆化温度范围里的使用过程中都会发生脆化。在回火马氏体的脆化中，钢是在脆化的温度范围里回火，并通常是在室温中使用放置。

temper embrittlement（**回火脆化**）　将低合金保持在一个温度范围或缓慢冷却地通过一个温度范围（一般为300～600℃或570～1110℉），即刚好低于相变温度范围而引起其脆化。脆化是杂质（如砷、锑、磷和锡）在晶粒边界的偏析所造成的，通常它会在塑性至脆性的相变温度里得到提升。通过临界温度以上的再回火及随后的快速冷却，就可以使回火脆化发生逆转。比较 *tempered martensite embrittlement*（*回火马氏体脆化*）。

tempering（**回火**）　在热处理中，将硬化钢再次加热至低于共析点以下的某一温度，以便降低一些硬度和/或提高韧性。

temper rolling（**硬化冷轧、表面光轧**）　薄钢板的轻冷轧可以提高其平整度，并使拉应变的变形减少到最小，还能获得规定的硬度或回火。

tensile strength（**抗拉强度**）　在拉伸试验中的最大载荷与原始横截面积之比。也叫 *ultimate strength*（*极限强度*），对照 *yield trength*（*屈服强度*）。

tensile stress（**拉应力**）　造成弹性体中的两部分拉开的应力，作用于一个典型应力平面的两侧。对照 *compressive stress*（*压应力*）。

tensile testing（**拉伸试验**）　见 *tension testing*（*拉伸试验*）。

tension（**拉力**）　引起延伸的力或载荷。

tension testing（**拉伸试验**）　一种测试材料在同轴载荷作用下进行延伸时的性状的试验方法。将已知长度和直径的试件两头夹紧，然后慢慢延伸并控制其速度直至发生断裂。即所谓的 *tensile testing*（*拉伸试验*）。

terminal phase（**终端相**）　一种具有严格化学成分范围的固溶体，其范围的一端为合金系统的单纯组分。

terminal solid solution（**终端固溶体**）　在一个多组分的系统里，包括作为系统组分中的任何一种化学成分具有其范围极限的固相。也见 *solid solution*（*固体溶质*）。

ternary alloy（**三元合金**）　包含三种主要元素的合金。

ternary system（**三元系统**）　通过以所有各种比例混合的三种组分而成的全系列成分合金。

terne（**铅锡合金**）　一种 $w(\mathrm{Sn})$ 为3%～15%的铅合金，用于薄钢板或钢板的热浸镀。long terne（长铅锡合金）用于表示铅锡合金镀的薄板，short terne（短铅锡合金）用于表示铅锡合金镀的中厚板。铅锡合金镀层的外观为平滑而无光泽（terne在法文中是无光泽和黯淡的意思），因此使钢具有更好的耐腐蚀性，并且提高了其成形、软钎焊和油漆的能力。

tertiary creep（**加速蠕变**）　见 *creep*（*蠕变*）。

texture（**晶体结构、组织**）　在一个多晶体的聚集体中的晶体方位的分布状态。按照通常的含义它与 *preferred orientation*（*择优取向*）同义，即其方位的分布是非随机的。不要与 *surface texture*（*表面纹理*）相混淆。也见 *fiber*（*纤维流线*）。

thermal aging（**热时效**）　将材料或零件置于一定的受热条件或事先以程序排好的时间间隔及其顺序的条件里进行处理。

thermal analysis（**热分析**）　通过记录发生热滞时的温度来确定金属所发生相变的一种方法。这种热滞可用所画曲线的曲率变化或机械地跟踪加热和冷却的曲线来表示。在加热和冷却接近平衡的条件下，

这些数据若是可靠的，其方法通常用于构成相图所要求确定的某些临界温度。

thermal cutting(热切割)　通过熔化对金属(材料)进行切割的一类切割工艺。也见 *air carbon arc cutting(碳弧气割)*、*carbon arc cutting(碳弧切割)*、*electron beam cutting(电子束切割)*、*laser beam cutting(激光束切削)*、*metal powder cutting(金属粉末切割)*、*oxyfuel gas cutting(氧燃气体切割)*、*oxygen arc cutting(氧弧切割)*、*oxygen cutting(氧切割)*和 *plasma arc cutting(等离子电弧切割)*。

thermal decomposition(热分解)　(1)高温下化合物分解成为元素类物质。(2)用气体化合物生产细的固体颗粒的工艺。也见 *carbonyl powder(碳酰粉)*。

thermal electromotive force(热电动势)　在由两种不相同金属构成的电路里所产生的电动势，此时一端的温度不同于另一端。也见 *thermocouple(热电偶)*。

thermal embrittlement(热脆化)　马氏体时效钢由于热变形加工后的不适当工艺处理而使韧性降低，从而导致其晶间断裂。热脆性发生在加热超过1095℃(2000℉)再缓慢冷却至980～815℃(1800～1500℉)的温度范围，发生脆化的原因是在冷却通过上述的临界温度范围期间碳化钛和碳氮化钛在奥氏体的晶体边界上析出。

thermal fatigue(热疲劳)　由于存在温度梯度而造成断裂，因为这种梯度以一种就像在组织中产生周期性应力一样的方式随时间而变化。

thermal inspection(热检测)　一种无损检测方法，利用一种热感装置测量在组分、组织、系统或物理过程发生变化时的温度。只要裂纹的深度不接近其直径，热感方法对探测亚表层的裂纹和孔隙是十分有用处的。当物体的厚度增加，用其检测亚表层裂纹的效果就会变差，因为缺陷所处的深度可能也会增加。

thermally induced embrittlement(热感应脆化)　见 *embrittlement(脆化)*。

thermal-mechanical treatment(热形变处理)　见 *thermomechanical working(热形变加工)*。

thermal shock(热冲击)　形成一个急剧的温度梯度，并伴随着在材料或组织里产生的高应力。

thermal spraying(热喷涂)　一类涂层或焊接工艺，用细末的金属或非金属材料的熔化或半熔化的状态形成一层涂层。这种涂敷材料可以是粉末、杆形或丝状的形式。也见 *electric arc spraying(电弧喷涂)*、*flame spraying(火焰喷涂)*、*plasma spraying(等离子溅射)*和 *powder flame spraying(粉末火焰喷涂)*。

thermal stress(热应力)　由于材料内部的温度不均匀分布而引起的应力。

thermal wear(热磨损)　在滑动或滚动的过程中，由于材料的软化、熔化或升华而造成其损耗。对于热磨损的一般性描述还可以包含热冲击和高温腐蚀。在高温下，分离原子从一个物体扩散到另一个物体的磨损，有时也称为热磨损。

thermit reaction(铝热反应)　强发热的自扩张反应，如细粉末铝与金属氧化物发生的反应。铝与氧化铁的混合物会产生的热量足以对钢进行焊接，钎料也是在反应中产生。也见 *thermit welding(铝热焊接)*。

thermit welding(铝热焊接)　一种通过金属氧化物与铝之间的化学反应产生过热的液态金属，以此使金属熔合在一起的一种焊接工艺，期间是否来用压力可视情况而定。从液态金属里获得钎料。

thermochemical machining(热化学加工)　通过点燃一种由天然气与氧气混合而成的可爆、可燃的混合气体，以此形成的可燃性热气体；而工件就是在这种气体中实现材料的切除——通常只是飞边和毛刺。即所谓的热能法。

thermochemical treatment(热化学处理)　钢的这种热处理是在适当选用的介质中进行的，通过与介质之间的交换使工件发生化学成分的变化。

thermocouple(热电偶)　一种测量温度的装置，由两种不同种类的金属或合金构成的测量棒，它们的一端相连接可通电，而另一端与带有电压的测量仪器相接。当其相连接的一端比另一端更热时就会产生与冷热两端的温差粗略成正比的热电动势。

thermomechanical working(热加工)　一般指各种把可控加热和变形处理结合在一起，并取得复合效果(如提高强度)但又不降低韧性的金属成形工艺。与形变热处理(thermo-mechanical treatment)相同。

thief(辅助极面)　用于电镀工艺中的一种电流转移装置或无功效模面，其目的在于为电镀零件提供更为均匀的电流。这种辅助极面吸收形状不规则的零件上分布的不均匀电流，用于保证零件表面厚度均匀的电镀层。也见 *robber(辅助阴极)*。

thin-wall casting(薄壁铸件)　此术语用于定义具有能满足其使用功能的最小壁厚的铸件。

threading(加工外螺纹)　在圆柱面上加工出外螺纹。

thread rolling(搓压螺纹)　通过在两个刻有螺纹槽的模板之间的搓滚工件来加工螺纹，其中只有一个模板运动。也可在两个都转动的刻有螺纹槽的辊子间进行辊碾。

three-quarters hard(**四分之三回火硬度**) 铁合金或某些铁合金的一种回火，其特征为强度和硬度约取在半硬和全硬回火的中点。

three-point bending(**三点弯曲**) 一种金属零件或结构件的弯曲，将它置于两个支撑点上，而力作用于支撑点的中间并另一侧。也见 *V-bend die*(*V形弯曲模*)。

threshold stress(**门槛应力值**) 作为应力腐蚀开裂的门槛应力值。在规定的条件下，应力腐蚀开始发生时的毛截面上的临界应力。

throwing power (1)(**着电效率**)。表面上一点的电流密度与它离反电极距离两者之间的关系。以电极反应所表示的表面电阻率与电解液的体积电阻率之比越大，则其工艺的着电效率也越好。(2)(**均镀能力**)。电镀液在不规则形状的阴极表面生成均匀金属分布的能力。与 *covering power*(*覆盖能力*)相比。

tiger stripes(**虎纹条**) 在薄板或带钢表面沿轧制方向的连续光亮条纹。

TIG welding(**钨惰性气体焊接**) 钨惰性气体焊接，见优先选用术语 *gas tungsten arc welding*(*气体保护钨极电弧焊*,*GTAW*)。

tilt boundary(**倾斜晶界**) 由一排边缘位错构成的亚(二次)晶粒的边界。

tilt mold(**倾斜铸型**) 一种铸型，通常为叠箱(金属型)铸型，在浇注时它能从水平旋转到垂直位置上，由此减少搅动和氧化物的形成及其夹杂。

tilt mold ingot(**倾斜铸型铸锭**) 用倾斜铸型浇铸的铸锭。

time quenching(**定时淬火**) 淬火零件在其冷却过程中的冷却速度必须在某一时刻突然改变的一种淬火。

time-temperature-transformation(**TTT**) **diagram**(**时间-温度-转变图**) 见 *isothermal transformation*(*IT*) *diagram*(*等温转变图*)。

tinning(**镀锡**) 镀在金属上的熔化软钎焊料或硬钎焊料的非常薄的镀层。

tin pest(**锡瘟**) 一种锡的多晶改型，因为当它粉碎成粉末时，就是所谓的灰锡。若其最高转化速度发生在大约 -40℃(-40℉)时，还是可以接受，但是转化能约发生在高达13℃(55℉)的温度时。

tint etching(**着色腐蚀**) 将金相分析样件浸没于特殊配方的化学腐蚀剂中，以便在样件表面生成稳定的薄膜。在光学显微镜下观察，这些薄膜呈现出相应于合金里不同相的各种颜色。即所谓的色蚀。

tin tossing(**熔锡氧化物杂质**) 在空气中将熔化锡从一个熔锅倒入另一个熔锅里时，熔锡里的杂质经氧化形成一种可剥离的渣屑。

toggle press(**曲柄杠杆冲床、肘杆压力机**) 一种机械式压力机，其滑块是用一副或多副曲柄连杆或机械机构驱动的。

tolerance(**公差**) 为特定的名义尺寸所规定的允许偏差，或是零件的尺寸或其他质量特征所允许的变化范围。

tolerance limits(**公差极限值**) (上或下的)极限值，用于规定零件尺寸或其他质量特征所允许变化的范围。

tonghold(**夹头**) 锻坯上的一个部分，通常位于钢坯的一端，即由锻工用钳子夹住的部位。锻打结束将其截去。它为落锤与冲压型的锻造所通用。

tooling(**工具**) 一般指模具组装以及与金属成形和锻造有关的一些工装器具。

tool steel(**工具钢**) 各种类型通用于制造工具的碳素钢和合金钢。工具钢的特征为高硬度和高耐磨性，通常还伴以高韧性和在高温下能防止发生软化。这一般都需要含有高碳和高合金。

tooth(**齿**) (1)多刃刀具(例如锯子、铣刀或锉刀)上的凸起，用于进行切削。(2)圆轮周边上的凸起，也可为部分圆周上的——例如齿轮、花键或链轮——用于与另一个机件相啮合，从而传递力、运动或两者兼而有之。在平形零件上的类似凸起，如齿条。

tooth point(**齿尖**) 端铣刀上经倒棱修磨的切削刃，有时刃口还要加上一平面，以此产生刮剃的效果并降低表面粗糙度。

top-and-bottom process(**奥辐德顶底分层炼镍法**) 一种分离铜与镍的工艺，加入硫化钠将它们的熔化硫化物分成两层液体。其下层包含了大部分的镍。

torch(**焊、割炬**) 见优先选用术语 *cutting torch*(*oxyfuel gas*)(氧气乙炔割炬)和 *welding torch*(焊炬)。

torch brazing(**焰炬加热硬钎焊**) 一种硬钎焊工艺，其需要的热是由燃气炬焰所提供的。

torch soldering(**焰炬加热软钎焊**) 一种软钎焊工艺，其需要的热是由燃气炬焰所提供的。

torsion(**扭转**) (1)实心或管形物体绕其轴线的扭转变形，这样原来跟轴线平行的线条都变成了螺旋状。(2)造成切应力和切应变的扭转作用。

torsion moment(**转矩**) 在被扭转的物体里，所有相对于其扭转轴的外加力偶、力矩或两者的代数和。

total carbon(**总碳量**) 在铁合金里游离碳和结合碳(包括溶体里的碳)的总和。

total elongation(总延伸)　在拉伸试验中，断裂的试件的永久性延伸的总量，通常用相对于固定其上的标距百分比表示。也见 *elongation, percent (伸长率,百分比)*。

toughness(韧度)　材料在发生断裂以前吸收能量和发生塑性变形的能力。韧度与应力-应变曲线以下从原点到断裂点之间的面积成正比。作为金属，其韧度是用它在缺口冲击试验里所吸收的能量度量的。也见 *impact test (冲击试验)*。

tough pitch copper(韧铜、火精铜)　w(O)0.02%~0.04%的铜，用反射炉精炼得到的铜。

tracer milling(仿形铣)　一种三维仿形加工，加工所用的铣刀是用仿形模板所控制的随动机构进行导向。

tramp alloys(杂散合金)　由于成分不明的废铁炉料被装入炉里，而进入钢中的残余合金元素。

tramp element(杂散元素)　炉料组分、熔化金属或铸件中都含有杂质，它们的存在对于铸件的质量可以认为是无关紧要的或无甚影响的。也称微量元素(trace element)。

transcrystalline(穿晶体)　见 *transgranular (穿晶)*。

transcrystalline cracking(穿晶体开裂)　穿越或横跨一个晶体所发生的开裂或断裂。也称为 *intracrystalline cracking (晶体内开裂)*。

transformation hardening(相变硬化)　钢经奥氏体化后有条件地进行冷却的热处理，从而使奥氏体或多或少地全部转变为马氏体，可能还有贝氏体。

transformation-induced plasticity(相变诱发塑性)　一种主要发生在某些高合金钢里的现象，将其热处理到产生亚稳态的奥氏体或亚稳态的奥氏体+马氏体，这样，在以后的变形中部分奥氏体经过应变诱发的相变而转化为马氏体。能以这种方式相变的钢通称为TRIP钢，经过热处理可以有很高的塑性，但也表现出非常高的应变硬化率，于是在大约20℃和500℃(70℉和930℉)的温度之间发生塑性变形之后，具有高抗拉强度和屈服强度。是否要求将其冷却到195℃(320℉)并完全相变为马氏体可视情况而定。相变后通常还要进行回火。

transformation range(相变温度范围)　在加热过程中生成奥氏体，然后在冷却过程中发生相变的温度范围。这两个范围是不同的，有时可重叠，但绝不会重合。范围的极限温度则取决于合金成分和温度的变化速度，尤其是在冷却的过程里。也见 *transformation temperature (相变温度)*。

transformation temperature(相变温度)　发生相变的温度。该术语有时用于表示相变温度范围的极限温度。以下符号用于表示铁和钢的一些相变温度。

符号	说明
Ac_{cm}	过共析钢
Ac_1	在加热过程中，奥氏体开始生成时的温度
Ac_3	在加热过程中，从铁素体到奥氏体转变结束时的温度
Ac_4	在加热过程中，奥氏体转变为δ铁素体时的温度
Ae_{cm}、Ae_1、Ae_3、Ae_4	相变达到平衡时的温度
Ar_{cm}	过共析钢
Ar_1	在加热过程中，从奥氏体到铁素体或铁素体加渗碳体转变结束时的温度
Ar_3	在冷却过程中，从奥氏体到铁素体转变开始时的温度
Ar_4	在冷却过程中，δ铁素体转变为奥氏体时的温度
Ar'	在冷却过程中，奥氏体到珠光体转变开始时的温度
Mf	在冷却过程中，从奥氏体到马氏体转变结束时的温度
Ms(或Ar'')	在冷却过程中，从奥氏体到马氏体转变开始时的温度

注：表中除了生成马氏体的转变外，所有在冷却过程中发生转变的温度都低于加热过程中发生转变的温度，这还取决于温度的变化速率。

transgranular(穿晶)　穿越或横跨晶体或晶粒的，也叫晶粒内的或晶体内的。

transgranular cracking(穿晶开裂)　穿越或横跨一个晶体或晶粒所发生的开裂或断裂。也称 *transcrystalline cracking (穿晶体开裂)*。对照 *intergranular cracking (晶间开裂)*。

transgranular fracture(穿晶断裂)　穿越或横跨一种材料的一个晶体或晶粒所发生的断裂。也称穿晶体断裂(transcrystalline fracture)或 *intracrystalline fracture (晶体内断裂)*。对照 *intergranular fracture (晶间断裂)*。

transition lattice(过渡晶格)　一种不稳定的晶体学

结构形态，是在如固溶体析出或共析分解的固态反应中，作为一种中间阶段而形成的。

transition metal（过渡金属） 作为一种金属，其电子能级可以被占据的方式为 *d*-带含有少于每个原子最多10个电子的数量，例如铁、钴、镍和钨。过渡金属的这些独特性质是由于其 *d*-能级未能完全被电子填满所致。

transition phase（过渡相） 出现在化学系统中的一种非平衡状态，它处于两种平衡状态之间的转变过程中。

transition point（过渡点） 在一定的压力下，两种固相处于平衡的温度（或在一定温度下的压力）——即一种同素异性的相变温度（或压力）。

transition structure（过渡组织） 从固溶体里析出来粘附于基体上的亚稳态沉淀物。

transition temperature（过渡温度） （1）一个特意定义的温度，它处于金属的断口特征（通常由缺口试件判定）发生迅速改变的温度范围里，例如从塑性达到脆性的过渡温度（DBTT）。DBTT可以用几种方法评定，最为常见的方法是50%塑性断口和50%脆性断口的温度（即显示50%断裂的过渡温度，或FATT），或者断口为100%塑性（100%纤维为其判据）时的最低温度。（2）有时用于表示特意定义的温度，它处于塑性随温度而迅速改变的范围里。

transverse direction（横向） 字面上为“横越”的意思，通常表示与加工方向相垂直的方向或平面。在轧制的中厚板或薄板里，横向宽度方向常叫长横，而其厚度（或高度）方向则称为短横。

transverse rolling machine（横轧机） 一种利用圆形钢坯生产复合预制坯料或成品锻件的轧机，钢坯横向挤入两个或三个以相同方向转动并驱动钢坯的轧辊里。轧辊上装有可更换的且带有一定凹型的拼合模块，工件每转一周，轧辊要转若干周。

transverse rupture strength（横向折断强度，TRS） 由弯曲应力公式计算得到的，使一定尺寸的粉末冶金试件折断所需要的应力。试件支撑点接近于两端，载荷作用于由支点所确定的中心线中点。TRS值可以利用下式由折断载荷计算得到：

$$\mathrm{TRS}=\frac{3FL}{WH^2}$$

式中，F 为折断时的载荷；L 为两个支点间的跨距；W 和 H 分别为试棒的宽度和高度。

trees（枝状镀痕） 在电镀表面的高电流密度处形成的一种电镀金属凸出镀痕，肉眼可辨。

trepanning（套孔） 使用一把或多把刀具（通常均为单刃刀头）并绕一个中心旋转，在实心的毛坯上加工出圆孔或沟槽，或者用实心毛坯加工成圆盘、圆柱或管子的切削工艺。

triaxiality（三维应力比） 在一个三维拉应力的应力状态中，最小主应力与最大主应力之比。

triaxial stress（三维应力） 三个主应力均不为零的应力状态。也见 *principal stress (normal)（主应力（法向））*。

tribology（摩擦学） （1）研究作相对运动的表面间的相互作用及其相关实践的科学和技术。（2）涉及作相对运动的接触表面（例如轴承、凸轮或齿轮）的设计、摩擦、润滑和磨损有关的学科。

trimmer blade（切边刀板） 切边机上的一部分，将锻件推压通过这个刀板用于切除毛边。

trimmer die（切边模） 用于从锻件上切去毛边的冲压模具。

trimmer punch（切边冲头） 切边机的上面部分，用于接触锻件并将其推压通过切边刀板，切边冲头的下端形状一般与它所推的锻件表面相配。

trimmers（切边机） 作为组装件包括切边冲头、切边刀板以及可能用于从锻件上将毛边清除的切边模板。

trimming（切边） （1）锻造中，用切边压床上的切边机切除零件上的分型线毛边或多余材料，可以热切或冷切。（2）拉伸中，剪切拉伸件的不规则边缘。（3）铸造中，切除浇口、冒口和毛刺。

trimming press（切边压床） 适用于切除锻件毛边的动力冲床。

trimming shoe（切边模板） 用于支承切边机的托架，有时也叫切边座板。

triple-action press（三动压力机） 一种机械或液压压力机，它的三个滑块具有三种适当同步的运动，以此实现拉伸、再拉伸和成形的三种动作。通常两个滑块——支架滑块和柱塞滑块——位于上面，而下滑块位于机身里面。也见 *hydraulic press（液压机）*、*mechanical press（机械压机）* 和 *slide（滑块）*。

triple point （1）（**三相点**）。在相图上，一种物质的三相共同处于平衡的那一点。（2）（**三晶交界点**）。三个毗邻晶粒的晶界交汇的一点，可以从金相磨片上观察到。

TRIP steel（TRIP钢） 一种展现 *transformation-induced plasticity（相变诱发塑性）* 的工业用钢。

troostite（obsolete）（托氏体，现已不用） 不易预先溶解且能快速腐蚀的碳化物和铁素体的细颗粒聚集

物，是通过低温下进行马氏体回火或将钢以低于临界冷却速度的速度进行淬火而生成的。作为前者优先选用的术语是回火马氏体，而后者则是细颗粒珠光体。

Troy ounce(金衡制英两) 一种贵重金属的金衡制重量单位，它等于31.1034768g(1.0971699oz,常衡制)。

true current density(实际电流密度) 见优先选用术语 *local current density(局部电流密度)*。

true strain(实际应变) (1)由一定的载荷增量引起的尺度变化量与就在该载荷增量作用之前的尺寸的比值。(2)在承受轴向力的物体上，在观察那一时刻的标距长度与原始标距长度之比的自然对数值。即所谓的自然应变。

true stress(实际应力) 在给定时刻作用于一个零件上的载荷除以所作用的横截面面积所得到的值。

truing(修磨砂轮) 把砂轮的最外磨料颗粒层打磨除去，以恢复其磨削面。

tuberculation(腐蚀瘤) 散布在表面的局部腐蚀生成物，呈现为疙瘩状的分布，称之为小结瘤。这种小结瘤的形成通常与生物腐蚀相关。

tube reducing(管材减径) 利用一根心轴和一对辊子减小管材的直径和壁厚。也见 *spinning(旋压成形)*。

tube sinking(减径拔管) 通过模具或者让管子穿过辊子来控制管材加工中不使用管内工具(如心轴或芯棒)来控制其内径，拔管一般用于生产壁厚与长度都增加的管材。

tube stock(管坯) 管材的半成品，适用于后续的减径或精加工。

tumbling(滚筒清理) 将工件(通常为铸件或锻件)放进滚筒，再加入部分的金属块或磨料，经过滚动去除砂子、氧化皮或毛刺。可以采用干滚或在筒内加入一些水溶液。也见 *barrel finishing(滚筒精整加工)*。

Turk's-head rolls(互成直角的四辊轮拉丝模) 四个不用驱动的工作辊轮并排列成正方形或矩形，然后从中拔出带材、线材或管材，以此形成方形或矩形的截面。

turning(车削) 使用单刃刀头的刀具挤压旋转的工件表面，以此切除表面的材料。当切除材料时刀具是否朝向轴线或沿着旋转轴线作移动可视情况而定。

tuyere(风口、风嘴) 冲天炉、高炉或转炉上送进空气或惰性气体的入口。

twin(孪晶) 一个晶体上有着确定方向关系的两部分，可以认为一部分是母体，而另一部分为孪晶。孪晶的方向是横越孪晶平面的母体方向的镜像，或是将孪晶部分绕孪晶轴旋转得到的方向。也见 *annealing twin(退火孪晶)* 和 *mechanical twin(机械孪晶)*。

twin bands(孪晶带) 从经过抛光和腐蚀的磨片上，可观察到横越在晶体上的一种晶带，带上的结晶方向通常与晶带侧边相平行的接合面的基体晶粒方向存在着镜像的关系。

twist boundary(扭曲型边界) 由一排螺旋形的位错构成的亚晶粒边界。

two-high mill(二辊式轧机) 在一座机架里，只装有两个轧辊，即工作轧辊的轧机。与 *four-high mill(四辊式轧机)* 和 *cluster mill(多辊轧机)* 相比。

type metal(活字合金) 含有铅(w(Pb)为58.5%~95%)、锑(w(Sb)为2.5%~25%)和锡(w(Sn)为2.5%~20%)的一类合金，用于制造印刷活字。在一些应用中，加入少量的铜(w(Cu)为1.5%~2.0%)以增加其硬度。

U

U-bend die(U形折板模) 一种用于折板成形的模具，它加工成水平的方形或矩形开口横截面，利用其两边可以让金属在里面拉制成槽形。

Ugine-Sejournet process(玻璃润滑剂高速挤压法) 一种用于金属的直接挤压工艺，它使用熔化玻璃隔绝热钢坯，同时起到润滑剂的作用。

ultimate elongation(极限延伸) 延伸至断裂。

ultimate strength(极限强度) 材料能够承受的不发生断裂的最大应力(拉应力、压应力或切应力)，用最大载荷除以试件的原始横截面积求得。即所谓的名义强度或最大强度。

ultimate tensile strength(极限抗拉强度) 在拉伸试验里，试件能够承受极限的最后(最大)的应力。

ultrahard tool material(超硬工具材料) 非常硬的和耐磨的材料——特别是多晶体的金刚石和多晶立方氮化硼——可将其制成用于切削加工的固体或切削刀头上的涂层。

ultrahigh-strength steel(超高强度钢) 最小屈服强度为1380MPa(200ksi)的结构钢。

ultraprecision finishing(超精研) 一种通过去除材料来改变表面的特征，如表面粗糙度、波纹度和圆度等的切削加工工艺。其例子还包括光学镜头、计算机芯片或磁头的研磨和抛光，以及缸套的珩磨。

ultrasonic beam(超声波束) 一束频率高于可听到的声音频率范围(即大约20kHz)的声辐射。

ultrasonic cleaning(超声波清洗) 借助于超声波的一种浸没式清洗，由超声波形成微搅动作用。

ultrasonic frequency(超声波频率) 作为弹性波的一种频率，它高于最高可听声音的频率，一般认为高于20kHz。

ultrasonic impact grinding(超声波冲击磨削) 磨料磨削的一种形式，它利用无旋转的超声波频率震动工具形成研磨砂浆对工件表面的冲击，以此切削材料。比较 *ultrasonic machining(超声波加工)*。

ultrasonic inspection(超声波检测) 一种无损检测方法，让高频声波束发射进入材料，以此探测表面和亚表层的瑕疵。声波穿过材料时，伴随着能量的损耗(衰减)，并在界面产生反射。反射束经显示和分析，便可确定瑕疵和缺陷的存在及其位置。大部分的超声波检测所用的频率为0.1～25MHz——远高于人类能听到的声音范围，即约为20Hz～20kHz。

ultrasonic machining(超声波加工) 利用旋转金刚石空心钻或铣刀的超声波震动进行材料的切除。该工艺并不包含磨料砂浆，而只是接触和切削工件。比较 *ultrasonic impact grinding(超声波冲击磨削)*。

ultrasonic soldering(超声波软钎焊) 软钎焊的一种变型，高频震动能量传递通过熔化的钎料，用于去除不利于钎焊的表面薄膜并促使基体表面的润湿。故这种工艺不需要伴以使用熔剂。

ultrasonic testing(超声波试验) 见 *ultrasonic inspection(超声波检测)*。

ultrasonic welding(超声波焊接) 一种固态焊接工艺，先以压力将结合面压在一起，然后对其局部施加高频震动能量，以实现材料的焊接。

underbead crack(焊道下裂纹) 一种焊缝热效应区的裂纹，一般不会延伸到基体金属里去。

undercooling(过冷) 同 *supercooling(超低温冷却)*。

underdraft(轧件下弯) 指当金属从轧辊经轧制出来时，由于上辊的转速较高而造成其向下弯垂的状态。

underfill(未充满) (1)在焊合件上的焊道表面下陷，或焊道底面延伸到毗连的基体金属表面以下。(2)锻件的一部分缺少足够的金属，以致无法按型腔的真实形状成形。

underfilm corrosion(膜下腐蚀) 发生在有机膜下面的腐蚀，并以螺旋线或点状的形式随机分布。在很多的情形里，它与 *filiform corrosion(丝状腐蚀)* 相一致。

understressing(低应力处理) 以一种低于寿命极限的循环应力作用于零件。如果以后再让它受到高于其寿命极限的循环应力作用，则可以提高其疲劳寿命。

uniaxial stress(单轴应力) 三个主应力中的两个均为零的一种应力状态。也见 *principal stress(normal)(主应力(法向))*。

uniform corrosion(均匀腐蚀) (1)一种均匀分布于金属表面的侵蚀(劣变)。(2)以差不多相同的速度在整个金属表面上持续着的腐蚀。也叫全面腐蚀。

uniform elongation(均匀延长) 拉伸试验中，当达到最大载荷并就在发生缩颈之前的试件的延长。

uniform strain(均匀应变) 在应变局部化(缩颈)开始之前所产生的应变，即在拉伸试验中载荷达到最大时的应变。

unit cell(晶胞、单位晶格) 晶体组织中包含一定数量原子的平行六面体单元，这种单元在空间的不断重复就构建成完整的晶体。

unit power(单位功率) 在切削或磨削的过程中，在单位时间内去除单位体积的材料所要求的净功率消耗。

universal forging mill(通用锻轧机) 四台液压机排列在一个配备钢坯机械手和自动控制的平面上，用于径向锻或拉锻。

universal mill(通用轧机) 一种用于在金属毛坯经受水平轧辊的多道轧制之间，以立轴轧辊辊压毛坯边缘的轧机。

upset (1)(镦粗)。在机械制造或焊接过程中，使用压力使工件或焊接件的局部横截面积增大。(2)(对焊)。焊接程序的一部分，即在其过程中借助压力使横截面积增大。(3)(对焊)。焊接中因施加压力而引起形体的变形。对焊可按照交接面积的增加、长度的缩短或厚度的减小(指叠压接缝)的百分比进行测量。

upset forging(镦锻件) 对适当长度的棒料、钢坯或粗轧坯通过镦粗获得的锻件。

upsetting(镦粗) 使毛坯的部分或全部横截面增加的金属加工。也见 *heading(镦头)*。

upset welding(对焊) 一种电阻焊工艺，其焊缝是在对接表面的全部面积上同时形成或者沿接合面逐渐形成的，先在接合处施加机械力(压力)，然后让电流流经接合面并加热对接面。在整个加热期间都要维持压力。

V

vacancy(空位) 一种组织缺陷，个别的原子位子发

生临时性缺位。

vacuum arc remelting(真空电弧重熔 VAR) 消耗性电极重熔工艺，由电极和金属锭块之间的电弧产生热量。工艺是在真空室里进行的。处于低气压中的金属熔滴能减少气体在金属中的溶解量。也见 *consumable-electrode remelting(自耗式电极重熔工艺)*。

vacuum carburizing(真空渗碳) 一种高温气体渗碳工艺，在其工艺过程的渗碳期间炉内压力保持在 13kPa 和 67kPa(0.1Torr 和 0.5Torr)之间。经受这种处理的钢在近似真空中奥氏体化，在碳氢气体的分压中渗碳，在近似真空中扩散，然后在油或气体中淬火。

vacuum casting(真空铸造) 一种在非常低的大气压里进行熔化和浇铸的铸造工艺；一种金属模铸造的形式，将铸型浸入液态金属，将铸型抽为真空，于是金属被吸入型腔。

vacuum degassing(真空脱气) 利用真空从熔化合金中去除溶解气体的技术。

vacuum deposition(真空沉积) 在真空中，利用金属蒸发技术使金属膜沉积在基体上。

vacuum furnace(真空炉) 一种用低大气压替代大部分热处理炉里所用的保护气体气氛的热处理炉。

vacuum hot pressing(真空热压) 一种在高温、固结压力和低大气压的条件下处理材料(尤其是金属和陶瓷粉末)的方法。

vacuum induction melting(真空感应熔化，VIM) 一种用于重熔和精炼金属的工艺，在真空室里利用感应热熔化金属。金属可以在坩埚里熔化然后倒入铸型。

vacuum melting(真空熔化) 在真空中熔化可以防止来自于空气的污染，并借此去除已溶解在金属里的气体。金属的凝固也可以在真空或低气压里进行。

vacuum nitrocarburizing(真空氮碳共渗) 一种低大气压的氮碳共渗工艺，使用一种 50% 氨/50% 甲烷的碱性气氛，里面还含有添加量达 2% 的可控氧气。

vacuum refining(真空精炼) 在真空中熔化，并从金属里去除气体污染物。

vacuum sintering(真空烧结) 在低气压中，陶瓷或金属的烧结。

vapor degreasing(蒸汽脱脂) 将工件置于沸腾的液体溶剂上面的蒸汽里进行脱脂，蒸汽被认为比空气重得多。油污中至少有一种的组分必须在溶剂中是可溶的。这种清洁工艺的改进还包括蒸汽-喷涂-蒸汽、温热液体-蒸汽、沸腾液体-温热液体-蒸汽，以及超声波脱脂。

vapor deposition(气相沉积) 见 *chemical vapor deposition(化学气相沉积，CVD)* 和 *physical vapor deposition(物理气相沉积，PVD)*。

vapor plating(气化渗镀、气相扩散渗镀) 通过一种挥发性化合物在低于沉积物和基体材料熔点的温度里还原或分解，使金属或化合物沉积于加热表面。这种还原通常利用气体还原剂(如氢)进行。其分解过程可以包括热分解或与基体材料的反应。也见 *vacuum deposition(真空沉积)*。

V-bend die(V 形弯曲模) 一般应用于折边成形的模具，通常将其加工成具有三角形横截面的开口，以其作为支承的两个侧面，从而达到三点弯曲的目的。

vent(透气口) 翻砂造型中，用于排气的小开口。

vermicular graphite iron(虫蛀形石墨铁) 同 *compacted graphite iron(致密石墨铸铁)*。

vibratory finishing(振动精磨) 一种去毛刺和精磨表面的工艺，将工件和研磨混合料置于一个容器内，并使其振动。

Vicers hardness number(HV)(维氏硬度值) 该数值由作用载荷与永久性的表面压痕面积确定，其压痕是用一个方基四棱锥的金刚石压头压出，棱锥的面角为 136°，用下式计算：

$$HV = 2P\sin\frac{\alpha/2}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2}$$

式中，P 为作用载荷(kgf)；d 为压痕的平均对角线长度(mm)；α 则为压头的面角(136°)。

Vickers hardness test(维氏硬度试验) 使用面角为 136°的金刚石四棱锥压头(维氏硬度压头)和不同的载荷所压的微压痕硬度试验，而且使用一种能覆盖全部的硬度范围，即从非常软的铅直到碳化钨的硬度刻度值。即所谓的金刚石棱锥硬度试验。也见 *microindentation(显微压痕)* 和 *microindentation hardness number(显微压痕硬度数值)*。

virgin metal(原生金属) 同 *primary metal(原始金属)*。

void(缩孔) (1)铸件或焊合件在冷凝的过程中产生的收缩孔穴。(2)这个术语一般用于指称油漆膜上的空白、孔眼和漏缺。

V process(薄膜、负压造型) 一种利用真空使砂子在铸型里定位的造型(铸造)工艺。半铸型上覆盖着塑料薄膜，以保持其真空。

W

walking-beam furnace(步进式加热炉) 一种由两条

轨道组成的连续式热处理炉或烧结炉，一条为固定的，一条为可移动的，由它们将零件举起并送进炉膛里。借助这种系统，移动轨道将工件从固定轨道上抬起，向前推进，再回落到固定轨道上。随后移动轨道回到起始位置再重复其向前运送零件的过程。

Wallner lines(沃纳线) 一组组平行线交错而成的独特痕迹样式，有时会产生一组组V形的线痕，有时在脆性断口表面上的要用高倍电子显微镜才能观察到。沃纳线的产生是由于冲击波和脆性裂纹前沿向前高速扩展时，两者之间的交替作用。有时候沃纳线被误以为是疲劳条纹。

warm working(温变形加工) 在低于重结晶的高温里进行的成形加工。其屈服应力和应变硬化率随着温度的升高而减小，因此比冷变形加工所需要的力更小。也见 *cold working (冷变形加工)* 和 *hot working (热变形加工)*。

warpage(翘曲、扭曲) (1)与铸件由凝固到室温时发生收缩所不同的一种变形。(2)在退火、应力消除及高温用途里发生的扭曲变形。

wash (1)(**涂刷**)。浇铸前在型腔表面涂刷的一层面砂。(2)铸件表面类似于 *cut(3)(型砂侵蚀)* 的缺陷。

wash metal(冲刷金属) 用于冲刷炉子、钢包或其他类似容器的熔化金属。

waterjet/abrasive waterjet machining(水力喷射/磨料水力喷射切削) 一种流体动力切削工艺，利用高速水流作为切削刀具。如果射流仅由水构成，则这种工艺只能用于切割非金属材料。然而当将很细的磨料颗粒注入水里，则其工艺能用于切割更硬、更密实的材料。磨料水力喷射切削已把流体喷射切削的应用范围扩大到金属、玻璃、陶瓷和复合材料的切割上。

water quenching(水淬) 用水作为淬火介质的淬火。水淬的主要缺点是在其淬火过程的开始或热态阶段的效能很差。也见 *quenching (淬火)*。

waviness(波纹度) 相对完好表面如同波形的变化，一般来说其变化的幅度和宽度，都比由刀具和砂轮产生的粗糙度大很多。

wax pattern(蜡型) 通常将熔化蜡倒入或注入模具或铸型而获得的一种计入收缩量的铸件，并包括所需浇口的精密复制模型。也见 *investiment casting (熔模铸造)*。

wear(磨损) 固体表面由于其表面与接触表面或物质之间的相对运动而造成的损坏，一般包括材料的逐渐失去。比较 *surface damage (表面损坏)*。

wear debris(磨损碎屑) 在磨损过程中，脱落下来的颗粒。

wear pad(磨损垫) 在成形过程中使用的一种具有名义厚度的、可塑的橡胶或类似橡胶材料的垫块，将其放置支承膜片以减少膜片上的磨损。也见 *diaphragm (膜片)(2)*。

weathering(自然时效) 让材料暴露在户外的环境里。

weathering steels(自然时效钢) 铜基高强度低合金钢，即使在未经油漆的条件下，也具有很强的耐大气腐蚀能力。

weave bead(横摆焊道) 一种通过横向摆动焊接而成的焊道。

web (1)(**壁板**)。指锻件中比较平的、薄的部分，在筋肋与凸台之间起相互连接的作用，通常为平行于锻造平面的壁板或隔墙。也见 *rib (加强肋)*。(2)(**刀体**)。麻花钻或铰刀的刀体上的中心部分，用于连接其刃带。(3)(**肋板**)。加强肋或凸缘之间的连接板或扁薄的部分，如同工字梁、H梁或其他类似的型材。

weight percent(重量百分数) 成分的重量百分数。对照 *atomic percent (原子百分数)*。

weld(焊接) 金属或非金属的局部连接，通过把材料加热到适当的温度，是否施加压力可视情况而定；或仅仅施加压力，是否用焊条金属可视情况而定。

weldability(可焊性) 在所采用的制造条件下，材料具有焊接成为特定的、适当的设计结构，并满足使用要求的能力。

weld bead(焊道) 焊条沿单一路径的沉积。

weld crack(焊接裂纹) 在焊接金属中的裂纹。

weld decay(焊接侵蚀) 常见于不锈钢及某些镍基合金的晶间腐蚀，其发生是由于焊接过程中热效应区的敏感性所致。也见 *sensitization (敏感化)*。

welding(焊接) (1)将两件或多件材料连接在一起，其间可施加热和压力或两者兼而有之，填充材料可视情况选用，通过界面的熔化或重结晶形成局部性结合。填充材料的厚度大大超过在钎焊里存在的毛细管尺度。(2)还可将其扩展到硬钎焊和软钎焊。(3)在摩擦学里，指固体表面之间在任何温度下因直接接触而发生的粘着。

welding current(焊接电流) 在焊接一条焊缝时，焊接电路里的电流。

welding cycle(焊接过程) 焊接一条焊缝所包含的完

整系列的操作程序。

welding electrode(焊条) 见 *electrode (welding) (焊接用焊条)*。

welding ground(焊接地线) 同 *work lead (工件电线)*。

welding leads(焊接导线) 在一个焊接电路里，工件导线或焊条导线所使用的电缆线。

welding machine(焊机) 进行焊接操作的设备。例如点焊机、弧焊机和线焊机等。

welding rod(焊条) 用于焊接或钎焊的填料金属中的一种，后者并不通电流，可以将其填入焊接熔池，也可以预先置于接口处。

welding sequence(焊接步骤) 对焊合件或构件中，不同零部件进行焊接的顺序。

welding stress(焊接应力) 在焊接中，因局部加热和冷却造成的残余应力。

welding tip(焊嘴) 为焊接设计的焊炬嘴。

welding torch(arc)(电弧焊炬) 一种用于气体保护钨极电弧焊和等离子电弧焊工艺的装置，用于控制焊条的位置、为电弧传送电流和引导保护气流和等离子气流。也见 *gas tungsten arc welding (气体保护钨极电弧焊,GTAW)* 和 *plasma arc welding (等离子电弧焊,PAW)*。

welding torch(oxyfuelgas)(氧燃气焊炬) 一种用于氧燃气焊、火焰硬钎焊和火焰软钎焊的装置，用于引导由可控燃料气体燃烧所产生的加热火焰。也见 *oxyfuel gas welding (氧燃气体焊接,OFW)*。

welding wire(焊丝) 一种焊条形式，通常包装成盘状或卷状的，可以是导电或不导电的，这取决于所使用的焊接工艺。也见 *electrode (welding) (焊接用焊条)* 和 *welding rod (焊条)*。

weld interface(焊接界面) 指在熔焊中的焊缝金属与基体金属之间，在不用填料金属的固态焊缝中的基体金属相互之间，或在用填料金属的固态焊缝及钎焊中的填料金属与基体金属之间的界面。

weld line(焊线) 见优先选用术语 *weld interface (焊接界面)*。

weldment(焊合件) 通过焊接而拼装的组件。

weld metal(焊缝金属) 在焊接过程中，曾熔化的焊缝部分。

weld nugget(焊缝熔核) 在点焊、缝焊或凸焊中的焊缝金属。也见 *nugget (熔核)* 和 *resistance spot welding (电阻点焊)*。

weld pass(焊缝路径) 焊接或堆焊操作沿着接缝、焊缝熔敷或基体的单一进程。焊缝路径的结果是形成一条焊道、焊层或喷射熔敷。

weld pool(焊缝熔池) 在焊缝中，作为焊接金属中的尚未凝固的局部容积的熔化金属。

weld puddle(焊缝熔潭) 见优先选用术语 *weld pool (焊缝熔池)*。

weld reinforcement(焊缝加厚) 焊缝金属超过填满接头所需要的量。

Wenstrom mill(温斯屯姆轧机) 一种类似于通用轧机的轧机，但只是同时轧成其截面的边缘与侧面。

wet blasting(湿喷砂处理) 一种向工件表面高速喷射磨料砂浆水的清洗和研磨工艺。

wetting(润湿) (1)用流体向表面进行喷洒，有时也用表面吸附方法。(2)一种液体与固体之间的界面张力接触角成0°~90°的状态。(3)在固体基体金属上，分布一层连续的液态填料金属或熔剂的现象。

wetting agent(润湿剂) (1)一种能减小液体表面张力的物质，以此使液体更为容易地分布在固体表面。(2)一种表面作用剂，通过减小液体内部的附着力而形成润湿。

whisker(晶须) (1)单根的短结晶纤维或细丝，用于在基体材料中起强化作用。晶须的直径范围介于1~25μm，其形状比(长度与直径之比)一般为50~150。(2)从金属上长出细丝，常为极细的，有时在电镀过程中形成，也有时在精加工后的储藏和使用过程中自行生成的。

white etching layer(白腐蚀层) 指的是钢的一种表面层，如同磨片在腐蚀后所见到的，它比基体金属更白。它的出现可能是由于多种原因，包括由切削加工或表面摩擦引起的塑性变形，金相制备阶段加热到了表层奥氏体化的程度然后在冷却中硬化，以及外加元素扩散进入表面。

whiteheart malleable(白心可锻铸铁) 见 *malleable iron (可锻铸铁)*。

white iron(白口铸铁) 一种基本上不含石墨而大部分的碳都是以分离型的硬 Fe_3C 晶粒而存在的铸铁。白口铸铁显示一种白色的晶体形断口表面，因为其断裂是沿着碳化铁的片晶发生的。

white layer(白层) (1)在钢中由于氮化过程而形成的化合物层。(2)在摩擦学里的一种白色腐蚀层，一般都同铁合金有关，从轴承表面的金相横切面上可观察到。也见 *Beilby layer (贝尔俾层)*。

white metal(白色金属) (1)一般泛指锡基或铅基的熔点相对较低的一类白色金属。(2)从硫化物铜矿里熔炼得到的 w(Cu)约为77%的铳铜。

white rust(白锈) 氧化锌，锌或镀锌表面腐蚀的粉

末生成物。

Widmandatten structure(魏氏组织) 以一种几何图案为特征的组织，它起始于沿着原始固溶体的某些结晶平面而形成的一种新相。在这新相里的晶格方位与原始相里的晶格方向存在着结晶上的关联。这种组织本来是在陨石中观察到的，却易于在许多合金如钛中通过适当的热处理来形成。

wildness(冒涨) 熔融金属在冷却过程中由于包含太多的气体而形成强烈的搅动，以致金属从铸型或其他容器里剧烈地冒涨出来所处的一种状态。

winning(提炼) 利用任何合适的湿法冶金、火法冶金和电冶金的方法从矿石或化合物提取金属。

wiped coat(擦抹镀层) 一种热镀锌的镀层，在镀层凝固之前将全部游离锌从其上面有效地擦去，只留下薄薄的一层锌-铁合金层。

wiped joint(擦抹接头) 一种使用有较宽熔化温度范围的软钎料的软钎焊头，并且当将熔化钎料倒入接头处时，为钎焊提供所需热量。这种钎焊是用手持擦布或擦板的操作方式，抹成所要求的大小和轮廓。

wiper forming, wiping(回转弯曲成形) 让金属薄板型材或管材围绕模块或模具的弯曲成形方法，在此过程中这种模块与擦块或滑块作相对移动。

wiping effect(擦拭效应) 通过机械摩擦或擦拭使金属表面活性化，以此促进转化镀膜，如磷化镀膜的形成。

wire (1)(**线材**)。一种细的、柔性的、连续长条的金属，常见的都是圆形截面，而且通常都是用孔模拉制生产的。作为圆形线材的截面大小范围是从0.13~25mm(0.005~1in)。更大圆形的通常称为棒材。也见*flat wire(扁线)*。(2)(**导线**)。一种长的单根的电工金属导体，可以为实心的、绞合的或丝状的结构，还可以为裸露的或绝缘的。

wire bar(线材坯、线锭) 以韧铜(火精铜)为主的铸造型材，其截面基本上是方形，而且端部带锥度，用于热轧成圆棒，之后再进一步拉成线材。

wire drawing(线材拉制) 拉拔线材通过孔模，使其横截面积减小。

wire flame spray(火焰喷涂用线材) 一种热喷涂工艺的变型，其喷涂的材料制成线形或杆形。也见*flame spraying(火焰喷涂)*。

wire rod(盘条) 热轧成卷的坯料，将其用于冷轧成为线材。

wiring(翻边) 深拉制品、管材或薄板沿其边缘的翻卷成形，将线或杆插入卷边内以增强其边缘的刚性。也见*curling(卷边)*。

woody structure(木纹组织) 一种宏观组织，特别在锻铁和挤压的铝合金圆棒上见到，当发生断裂时，可由此显示其经延伸的分离表面。

work hardening(加工硬化) 同*strain hardening(应变硬化)*。

working electrode(工作电极) 在电化学电池中的试验或试件电极。

work lead(工件电线) 电弧焊电流的电源与工件之间的连接导线。也称为工件连接线、焊接接地或地线。

worm(蜗虫形表面缺陷) 由于气体的逸出使熔化金属挤穿(冒汽)凝固金属的顶部表层。也见*zinc worms(锌蜗形缺陷)*。

wrap forming(张拉成形) 见*stretch forming(拉伸成形)*。

wrinkling(皱褶) 金属薄板深拉后出现的一种波纹形状态，所在的金属部位是处于坯料的边缘和拉伸圆角之间。在其他的一些工序里，如果产生的压缩力不均衡，也会产生这种皱褶。

wrought iron(锻铁) 一种商业用铁，它由在铁素体基体中夹着渣质(硅化铁)的纤维构成。

X

X-ray(X射线) 一种具有穿透性的电磁射线，常通过将电子加速到高速，而后碰撞到固体物体被突然止住而产生的。X射线的波长范围从10^{-2}~10^{-1}Å，在研究中所用的平均波长大约为1Å，即所谓的伦琴射线或X辐射等。也见*electromagnetic radiation(电磁辐射)*。

X-ray diffraction(X射线衍射XRD) 为了推导一种样品的晶体特征数据——结晶组织、方向等，而采用的一种测量从该样品优先发散的X射线的发射角度(还有以不同角度散射的强度)的分析技术。

X-ray fluorescence(X射线荧光) 一种具有其X射线谱条特征的物质，在X射线照射下所进行的发射。

X-ray map(X射线图形) 一种强度图形(通常相对于图像而言)，图上的任何一处的强度与该处特定元素的浓度成正比。

X-ray photoelectron spectroscopy(X射线光电子能谱学,XPS) 一种能测定当受到单色X射线照射时的材料表面所发射的电子能谱的分析技术。

X-ray spectrometry(X射线波谱测定法) 一种借助于观察由已知晶格间距的晶体所衍射的X射线来

测量其波长的方法。

X-ray spectrum(X 射线谱)　X 射线光子的强度或数量相对于能量(或波长)的谱图。

X-ray topography(X 射线形貌图)　一种综合形貌学和 X 射线衍射的技术。所谓形貌学就是对一个区域的物理(表面)特性的详细描述或图形绘制。借助于 X 射线衍射的形貌分析法就是为了用于研究晶体材料中的晶格组织和缺陷。

Y

Y-block(单一基尔试块)　即单一的 *keel block(基尔试块)*。

yellow brass(黄铜,铜锌合金)　有时用于专指 65Cu-35Zn 类黄铜的名词。

yield　(1)(**屈服**)。结构材料的塑性变形的标记。即所谓的塑性流动或蠕变。也见 *flow(流动)*。(2)(**产品合格率**)。在生产运行中，生产的合格品数量与试图要生产的总数之比。(3)(**熔化生产率**)。铸件重量与注入铸型里的金属总重量之比。

yield point(屈服点)　材料的第一应力，通常小于最大能达到的应力，这时应变增加，而应力没有得到相应的增加。只有能显示一种局部的、不均匀的从弹性变形过渡到塑性变形的那些材料，才会形成一屈服点。如果在屈服后应力有一减小，就可区分出上屈服点和下屈服点。流动曲线突然下降时的载荷叫做上屈服点。在流动曲线所示的恒定载荷为下屈服点。

yield point elongation(屈服点延伸)　在显示屈服点的材料里，在拉伸完成时和开始中断屈服时，两者拉伸量的差值为屈服点拉伸。

yield strength(屈服强度)　当材料应力和应变的正比性为一个规定的相对偏差值时的应力值。对于许多材料都取此偏差值的 0.2%。与 *tensile strength(抗拉强度)* 相比。

yield stress(屈服应力)　高塑性材料在发生大的应变，而应力却没有进一步增加时所达到的应力值。

Young's modulus(杨氏模量)　这是弹性模量的同义词。即拉伸或压缩应力与由其造成的应变之比。也见 *modulus of elasticity(E)(弹性模量)*。

Z

zinc worms(锌蜗形缺陷)　作为高锌黄铜铸件的特征的一种表面缺陷，当锌蒸汽在铸型与金属的界面上冷凝时，就会发生这种缺陷，它在那里被氧化，随后被夹入固化的金属里。

zincrometal(涂色镀锌钢板)　一种经镀层的钢薄板卷材产品，它由以含有锌颗粒的混合氧化物为底层和以富锌有机物(环氧树脂)为表面的涂层所构成。它易于焊接、成形、油漆以及与普通所使用的粘附剂相兼容。涂色镀锌钢板应用于保护汽车的外车身、门板和面板不受腐蚀。

zone melting(区域熔化)　通常采用感应方法加热，使小体积的实心金属块(如常用金属圆棒)产生高度局部化的熔化。沿金属圆棒移动感应线圈，熔化区可以从一端转移到另一端。在一种液相线和固相线存在着很大成分差异的二元混合物里，在线圈沿圆棒移动时，可以通过浓缩液体中的一种组分从而得到很高的纯度。

第2节　工 程 数 据

表 1.1-1　金属和合金的密度

金属或合金	密度		金属或合金	密度	
	g/cm^3	lb/in^3		g/cm^3	lb/in^3
铝与铝合金			**铝与铝合金**		
铝(99.996%)	2.6989	0.0975	**锻压合金**		
锻压合金			3003	2.73	0.099
EC, 1060 合金	2.70	0.098	4032	2.69	0.097
1100	2.71	0.098	5005	2.70	0.098
2011	2.82	0.102	5050	2.69	0.097
2014	2.80	0.101	5052	2.68	0.097
2024	2.77	0.100	5056	2.64	0.095
2218	2.81	0.101	5083	2.66	0.096

（续）

金属或合金	密　度	
	g/cm³	lb/in³
铝与铝合金		
锻压合金		
5086	2.65	0.096
5154	2.66	0.096
5357	2.70	0.098
5456	2.66	0.096
6061，6063	2.70	0.098
6101，6151	2.70	0.098
7075	2.80	0.101
7079	2.74	0.099
7178	2.82	0.102
铸造合金		
242.0	2.81	0.102
295.0	2.81	0.102
356.0	2.68	0.097
380.0	2.76	0.099
413.0	2.66	0.096
443.0	2.69	0.097
514.0	2.65	0.096
520.0	2.57	0.093
铜与铜合金		
锻铜		
纯铜	8.96	0.324
电解韧铜(ETP)	8.89	0.321
还原铜，高残余磷(DHP)	8.94	0.323
易切削铜		
0.5% Te	8.94	0.323
1.0% Pb	8.94	0.323
锻压合金		
装饰铜，95%	8.86	0.320
商品青铜，90%	8.80	0.318
饰用青铜，87.5%	8.78	0.317
红铜，85%	8.75	0.316
下半轴瓦黄铜，80%	8.67	0.313
弹壳黄铜，70%	8.53	0.308
黄色黄铜	8.47	0.306

金属或合金	密　度	
	g/cm³	lb/in³
铜与铜合金		
锻压合金		
四-六黄铜，孟兹(锌铜)合金	8.39	0.303
加铅商品青铜	8.83	0.319
低铅黄铜(管材)	8.50	0.307
中铅黄铜	8.47	0.306
高铅黄铜(管材)	8.53	0.308
高铅黄铜	8.50	0.307
超高铅黄铜	8.50	0.307
易切削黄铜	8.50	0.307
铅孟兹(锌铜)合金	8.41	0.304
可锻黄铜	8.44	0.305
建筑用青铜	8.47	0.306
防腐蚀海军铜	8.53	0.308
海军黄铜	8.41	0.304
铅海军黄铜	8.44	0.305
锰青铜（A）	8.36	0.302
磷青铜		
5%(A)	8.86	0.320
8%(C)	8.80	0.318
10%(D)	8.78	0.317
1.25%	8.89	0.321
易切削磷青铜	8.89	0.321
镍铜		
30%	8.94	0.323
10%	8.94	0.323
镍银		
65-18	8.73	0.315
55-18	8.70	0.314
高硅青铜(A)	8.53	0.308
低硅青铜(B)	8.75	0.316
铝青铜，5% Al	8.17	0.294
铝青铜(3)	7.78	0.281
铝硅青铜	7.69	0.278
铝青铜(1)	7.58	0.274
铝青铜(2)	7.58	0.274

（续）

金属或合金	密　度	
	g/cm³	lb/in³
铜与铜合金		
锻压合金		
铍青铜	8.23	0.297
铸造合金		
铬铜(1%Cr)	8.7	0.31
88Cu-10Sn-2Zn	8.7	0.31
88Cu-8Sn-4Zn	8.8	0.32
89Cu-11Sn	8.78	0.317
88Cu-6Sn-1.5Pb-4.5Zn	8.7	0.31
87Cu-8Sn-1Pb-4Zn	8.8	0.32
87Cu-10Sn-1Pb-2Zn	8.8	0.32
80Cu-10Sn-10Pb	8.95	0.323
83Cu-7Sn-7Pb-3Zn	8.93	0.322
85Cu-5Sn-9Pb-1Zn	8.87	0.320
78Cu-7Sn-15Pb	9.25	0.334
70Cu-5Sn-25Pb	9.30	0.336
85Cu-5Sn-5Pb-5Zn	8.80	0.318
83Cu-4Sn-6Pb-7Zn	8.6	0.31
81Cu-3Sn-7Pb-9Zn	8.7	0.31
76Cu-2.5Sn-6.5Pb-15Zn	8.77	0.317
72Cu-1Sn-3Pb-24Zn	8.50	0.307
67Cu-1Sn-3Pb-29Zn	8.45	0.305
61Cu-1Sn-1Pb-37Zn	8.40	0.304
锰青铜		
60ksi	8.2	0.30
65ksi	8.3	0.30
90ksi	7.9	0.29
110ksi	7.7	0.28
铝青铜		
合金 9A	7.8	0.28
合金 9B	7.55	0.272
合金 9C	7.5	0.27
合金 9D	7.7	0.28
镍银		
12% Ni	8.95	0.323
16% Ni	8.95	0.323
20% Ni	8.85	0.319
25% Ni	8.8	0.32

金属或合金	密　度	
	g/cm³	lb/in³
铜与铜合金		
铸造合金		
硅青铜	8.30	0.300
硅黄铜	8.30	0.300
铁与铁合金		
纯铁	7.874	0.2845
铸铁锭	7.866	0.2842
锻铁	7.7	0.2
灰铸铁	7.15[1]	0.258[1]
可锻铸铁	7.27[2]	0.262[2]
球墨铸铁	7.15	0.258
高镍铁(Ni-耐蚀)	7.5	0.271
高铬白铁	7.4	0.267
0.06%C 钢	7.871	0.2844
0.23%C 钢	7.859	0.2839
0.435%C 钢	7.844	0.2834
1.22%C 钢	7.830	0.2829
低碳铬-钼钢		
0.5% Mo 钢	7.86	0.283
1Cr-0.5Mo 钢	7.86	0.283
1.25Cr-0.5Mo 钢	7.86	0.283
2.25Cr-1.0Mo 钢	7.86	0.283
5Cr-0.5Mo 钢	7.78	0.278
7Cr-0.5Mo 钢	7.78	0.278
9Cr-1Mo 钢	7.67	0.276
中碳合金钢		
1Cr-0.35Mo-0.25V 钢	7.86	0.283
H11 模具钢(5Cr-1.5Mo-0.4V)	7.75	0.280
其他铁基合金		
A-286	7.91	0.286
16-25-6 合金	8.08	0.292
RA-330	8.03	0.290
耐热镍铬铁合金 800	7.95	0.287
耐热镍铬铁合金 901	8.23	0.297
T1 工具钢	8.67	0.313
M2 工具钢	8.16	0.295
W1 工具钢	7.84	0.282

（续）

金属或合金	密度	
	g/cm³	lb/in³
铁与铁合金		
其他铁基合金		
O6 工具钢	7.70	0.277
A2 工具钢	7.86	0.284
H22 工具钢	8.36	0.302
L6 工具钢	7.86	0.284
P20 工具钢	7.85	0.284
20Cb3	8.08	0.292
20W-4Cr-2V-12Co 钢	8.89	0.321
镍铁合金(36%Ni)	8.00	0.289
海波尼克高磁导率镍钢(50%Ni)	8.25	0.298
4%Si	7.6	0.27
10.27%Si	6.97	0.252
不锈钢与耐热合金		
耐腐蚀钢铸件		
CA-15	7.612	0.2750
CA-40	7.612	0.2750
CB-30	7.53	0.272
CC-50	7.53	0.272
CE-30	7.67	0.277
CF-8	7.75	0.280
CF-20	7.75	0.280
CF-8M，CF-12M	7.75	0.280
CF-8C	7.75	0.280
CF-16F	7.75	0.280
CH-20	7.72	0.279
CK-20	7.75	0.280
CN-7M	8.00	0.289
耐热合金铸件		
HA	7.72	0.279
HC	7.53	0.272
HD	7.58	0.274
HE	7.67	0.277
HF	7.75	0.280
HH	7.72	0.279

金属或合金	密度	
	g/cm³	lb/in³
不锈钢与耐热合金		
耐热合金铸件		
HI	7.72	0.279
HK	7.75	0.280
HL	7.72	0.279
HN	7.83	0.283
HT	7.92	0.286
HU	8.04	0.290
HW	8.14	0.294
HX	8.14	0.294
锻压不锈钢与耐热钢		
301 号	7.9	0.29
302 号	7.9	0.29
302B 号	8.0	0.29
303 号	7.9	0.29
303 号	7.9	0.29
305 号	8.0	0.29
308 号	8.0	0.29
309 号	7.9	0.29
310 号	7.9	0.29
314 号	7.72	0.279
316 号	8.0	0.29
317 号	8.0	0.29
321 号	7.9	0.29
347 号	8.0	0.29
403 号	7.7	0.28
405 号	7.7	0.28
410 号	7.7	0.28
416 号	7.7	0.28
420 号	7.7	0.28
430 号	7.7	0.28
430F 号	7.7	0.28
431 号	7.7	0.28
440A，440B，440C 号	7.7	0.28
446 号	7.6	0.27

（续）

金属或合金	密度	
	g/cm³	lb/in³
不锈钢与耐热合金		
锻压不锈钢与耐热钢		
501号	7.7	0.28
502号	7.8	0.28
19-9DL	7.97	0.29
析出硬化不锈钢		
PH15-7Mo	7.804	0.2819
17-4PH	7.8	0.28
17-7PH	7.81	0.282
镍基合金		
D-979	8.27	0.299
镍铬钛80A	8.25	0.298
镍铬钛90	8.27	0.299
M-252	8.27	0.298
铬镍铁600	8.41	0.300
铬镍铁"X"550	8.30	0.300
铬镍铁718	8.22	0.297
铬镍铁"713C"	7.913	0.2859
沃斯帕洛依镍基合金(Waspaloy)	8.23	0.296
(雷内系列)镍基高温合金(René)41	8.27	0.298
哈氏耐蚀耐高温镍基合金(Hastelloy alloy)B	9.24	0.334
哈氏耐蚀耐高温镍基合金(Hastelloy alloy)C	8.94	0.323
哈氏耐蚀耐高温镍基合金(Hastelloy alloy)X	8.23	0.297
镍基高温合金(Udimet)500	8.07	0.291
GMR-235	8.03	0.290
CMSX-2	8.56	0.309
PWA1484	8.95	0.323
钴-铬-镍基合金		
N-155(HS-95)	8.23	0.296
S-590	8.36	0.301
钴基合金		
S-816	8.68	0.314

金属或合金	密度	
	g/cm³	lb/in³
不锈钢与耐热合金		
钴基合金		
V-36	8.60	0.311
HS-25	9.13	0.330
HS-36	9.04	0.327
HS-31	8.61	0.311
HS-21	8.30	0.300
钼基合金		
Mo-0.5Ti	10.2	0.368
铅与铅合金		
化学铅(99.90+%Pb)	11.34	0.4097
腐蚀铅(99.73+%Pb)	11.36	0.4104
砷铅	11.34	0.4097
钙铅	11.34	0.4097
5-95软钎料	11.0	0.397
20-80软钎料	10.2	0.368
50-50软钎料	8.89	0.321
锑铅合金		
1%锑铅	11.27	0.407
硬铅		
96Pb4Sb	11.04	0.399
94Pb-6Sb	10.88	0.393
8%锑铅	10.74	0.388
9%锑铅	10.66	0.385
铅基巴比特合金		
铅基巴比特		
SAE13	10.24	0.370
SAE14	9.73	0.352
合金8	10.04	0.363
砷铅		
巴比特(SAE15)	10.1	0.365
"G"巴比特	10.1	0.365
镁与镁合金		
镁(99.8%)	1.738	0.06279
铸合金		
AM100A	1.81	0.065

（续）

金属或合金	密度	
	g/cm³	lb/in³
镁与镁合金		
铸合金		
AZ63A	1.84	0.066
AZ81A	1.80	0.065
AZ91A，B，C	1.81	0.065
AZ92A	1.82	0.066
HK31A	1.79	0.065
HZ32A	1.83	0.066
ZH42，ZH62A	1.86	0.067
ZK51A	1.81	0.065
ZF41A	1.82	0.066
EZ33A	1.83	0.066
EK30A	1.79	0.065
EK41A	1.81	0.065
锻压合金		
M1A	1.76	0.064
A3A	1.77	0.064
AZ31B	1.77	0.064
PE	1.76	0.064
AZ61A	1.80	0.065
AZ80A	1.80	0.065
ZK60A，B	1.83	0.066
ZE10A	1.76	0.064
HM21A	1.78	0.064
HM31A	1.81	0.065
镍与镍合金		
镍(99.95% Ni + Co)	8.902	0.322
镍 200	8.89	0.321
镍 270	8.89	0.321
杜拉镍合金(Duranickel)301	8.26	0.298
铸镍	8.34	0.301
蒙乃尔镍铜合金(Monel)400	8.80	0.318
蒙乃尔镍铜合金("K"Monel)	8.47	0.306
蒙乃尔镍铜合金("H"Monel)(铸造)	8.5	0.31

金属或合金	密度	
	g/cm³	lb/in³
镍与镍合金		
蒙乃尔镍铜合金("S"Monel)(铸造)	8.36	0.302
铬镍铁(Inconel)625	8.44	0.305
镍-钼-铬-铁合金		
哈氏镍基合金(Hastelloy)B	9.24	0.334
哈氏镍基合金(Hastelloy)C	8.94	0.323
哈氏镍基合金(Hastelloy)D	7.8	0.282
哈氏镍基合金(Hastelloy)F	8.17	0.295
哈氏镍基合金(Hastelloy)N	8.79	0.317
哈氏镍基合金(Hastelloy)W	9.03	0.326
哈氏镍基合金(Hastelloy)X	8.23	0.297
镍-铬-钼-铜合金		
镍铬合金(Illium)G	8.58	0.310
镍铬合金(Illium)R	8.58	0.310
电阻合金		
80Ni-20Cr	8.4	0.30
60Ni-24Fe-16Cr	8.247	0.298
35Ni-45Fe-20Cr	7.95	0.287
康铜(Constantan)	8.9	0.32
锡与锡合金		
纯锡	7.3	0.264
软钎料		
30% Pb	8.32	0.301
37% Pb	8.42	0.304
锡巴比特		
合金 1	7.34	0.265
合金 2	7.39	0.267
合金 3	7.46	0.269
合金 4	7.53	0.272
合金 5	7.75	0.280
白金属	7.28	0.263
白镴(锡铅合金)	7.28	0.263
钛与钛合金		
99.9% Ti	4.507	0.1628
99.2% Ti	4.507	0.1628

（续）

金属或合金	密　度	
	g/cm^3	lb/in^3
钛与钛合金		
99.0% Ti	4.52	0.163
Ti-6Al-4V	4.43	0.160
Ti-5Al-2.5Sn	4.46	0.161
Ti-2Fe-2Cr-2Mo	4.65	0.168
Ti-8Mn	4.71	0.171
Ti-7Al-4Mo	4.48	0.162
Ti-4Al-4Mn	4.52	0.163
Ti-4Al-3Mo-1V	4.507	0.1628
Ti-2.5Al-16V	4.65	0.168
锌与锌合金		
纯锌	7.133	0.2577
AG40A 合金	6.6	0.24
AC41A 合金	6.7	0.24
商品轧锌		
0.08% Pb	7.14	0.258
0.06Pb，0.06Cd	7.14	0.258
03Pb，0.3Cd	7.14	0.258
铜硬化，轧锌，1% Cu	7.18	0.259
轧锌合金，1Cu，0.010Mg	7.18	0.259
Zn-Cu-Ti 合金，0.8Cu，0.15Ti	7.18	0.259
贵重金属		
银	10.49	0.379
金	19.32	0.698
70Au-30Pt	19.92	—
铂	21.45	0.775
Pt-3.5Rh	20.9	—
Pt-5Rh	20.65	—
Pt-10Rh	19.97	—
Pt-20Rh	18.74	—
Pt-30Rh	17.62	—
Pt-40Rh	16.63	—
Pt-5Ir	21.49	—
Pt-10Ir	21.53	—
贵重金属		
Pt-15Ir	21.57	—
Pt-20Ir	21.61	—
Pt-25Ir	21.66	—
Pt-30Ir	21.70	—
Pt-35Ir	21.79	—
Pt-5Ru	20.67	—
Pt-10Ru	19.94	—
钯	12.02	0.4343
60Pd-40Cu	10.6	0.383
95.5Pd4.5Ru	12.07①	—
95.5Pd4.5Ru	11.62②	—
永磁材料		
铜镍钴（Cunico）	8.30	0.300
铜镍铁（Cunife）	8.61	0.311
钴钼（Comol）	8.16	0.295
铝镍钴（Alnico）Ⅰ	6.89	0.249
铝镍钴（Alnico）Ⅱ	7.09	0.256
铝镍钴（Alnico）Ⅲ	6.89	0.249
铝镍钴（Alnico）Ⅳ	7.00	0.253
铝镍钴（Alnico）Ⅴ	7.31	0.264
铝镍钴（Alnico）Ⅵ	7.42	0.268
铁酸钡（Barium ferrite）	4.7	0.17
钴铁氧体（Vectolite）	3.13	0.113
纯金属		
锑	6.62	0.239
铍	1.848	0.067
铋	9.80	0.354
镉	8.65	0.313
钙	1.55	0.056
铯	1.903	0.069
铬	7.19	0.260
钴	8.85	0.322
镓	5.907	0.213

（续）

金属或合金	密　度	
	g/cm³	lb/in³
纯　金　属		
锗	5.323	0.192
铪	13.1	0.473
铟	7.31	0.264
铱	22.5	0.813
锂	0.534	0.019
锰	7.43	0.270
汞	13.546	0.489
钼	10.22	0.369
铌	8.57	0.310
锇	22.583	0.816
钚	19.84	0.717
钾	0.86	0.031
铼	21.04	0.756
铑	12.44	0.447
钌	12.2	0.441
硒	4.79	0.174
硅	2.33	0.084
银	10.49	0.379
钠	0.97	0.035
钽	16.6	0.600
铊	11.85	0.428
钍	11.72	0.423
钨	19.3	0.697
钒	6.1	0.22
锆	6.5	0.23

金属或合金	密　度	
	g/cm³	lb/in³
稀土金属		
铈	8.23③	—
	6.66④	—
	6.77⑤	—
镝	8.55⑥	—
铒	9.15⑥	—
铕	5.245⑤	—
钆	7.86⑥	—
钬	6.79⑥	—
镧	6.19④	—
	6.18③	—
	5.97⑤	—
镥	9.85⑥	—
钕	7.00④	—
	6.80⑤	—
镨	6.77④	—
	6.64⑤	—
钐	7.49⑦	—
钪	2.99⑥	—
铽	8.25⑥	—
铥	9.31⑥	—
镱	6.96③	—
钇	4.47⑥	—
铜系金属		
锕	10.1	0.3648
锫	14.78	0.5339
锎	15.10	0.5455
锯	7	0.3
锿	8.84	0.3194

①6.95～7.35g/cm³（0.251～0.265lb/in³）。　②7.20～7.34g/cm³（0.260～0.265lb/in³）。　③面心立方。　④六角晶系。　⑤体心立方。　⑥紧凑型六角晶系。　⑦菱形晶系。

表 1.1-2 金属和合金的线膨胀系数

金属或合金	温度/℃	膨胀系数/[μin/(in·℃)]
铝与铝合金		
铝(99.996%)	20~100	23.6
锻压合金		
EC, 1060, 1100	20~100	23.6
2011, 2014	20~100	23.0
2024	20~100	22.8
2218	20~100	22.3
3003	20~100	23.2
4032	20~100	19.4
5005, 5050, 5052	20~100	23.8
5056	20~100	24.1
5083	20~100	23.4
5086	60~300	23.9
5154	20~100	23.9
5357	20~100	23.7
5456	20~100	23.9
6061, 6063	20~100	23.4
6101, 6151	20~100	23.0
7075	20~100	23.2
7079, 7178	20~100	23.4
铸造合金		
242.0	20~100	22.5
295.0	20~100	22.9
356.0	20~100	21.4
380.0	20~100	21.2
413.0	20~100	20.5
443.0	20~100	22.1
514.0	20~100	23.9
520.0	20~100	25.2
铜与铜合金		
锻压铜		
纯铜	20	16.5
电解韧铜(ETP)	20~100	16.8
还原铜、高残留磷(DHP)	20~300	17.7
无氧铜	20~300	17.7
易切削铜, 0.5%Te 或 1%Pb	20~300	17.7
铜与铜合金		
锻压合金		
镀饰铜, 95%	20~300	18.1
商品青铜, 90%	20~300	18.4
首饰青铜, 87.5%	20~300	18.6
红色黄铜, 85%	20~300	18.7
低黄铜, 80%	20~300	19.1
弹壳黄铜, 70%	20~300	19.9
黄色黄铜	20~300	20.3
孟兹(锌铜)合金	20~300	20.8
铅商品青铜	20~300	18.4
低铅黄铜	20~300	20.2
中铅黄铜	20~300	20.3
高铅黄铜	20~300	20.3
超高铅黄铜	20~300	20.5
易切削黄铜	20~300	20.5
铅孟兹(锌铜)合金	20~300	20.8
锻造黄铜	20~300	20.7
建筑用青铜	20~300	20.9
防腐蚀海军铜	20~300	20.2
海军黄铜	20~300	21.2
铅海军黄铜	20~300	21.2
锰青铜(A)	20~300	21.2
磷青铜		
5%(A)	20~300	17.8
8%(C)	20~300	18.2
10%(D)	20~300	18.4
1.25%	20~300	17.8
易切削磷青铜	20~300	17.3
铜镍合金		
30%	20~300	16.2
10%	20~300	17.1
镍银		
65-18	20~300	16.2
55-18	20~300	16.7
65-12	20~300	16.2

（续）

金属或合金	温度/℃	膨胀系数/[μin/(in·℃)]
铜与铜合金		
锻压合金		
高硅青铜(A)	20~300	18.0
低硅青铜(B)	20~300	17.9
铝青铜(3)	20~300	16.4
铝硅青铜	20~300	18.0
铝青铜(1)	20~300	16.8
铍铜	20~300	17.8
铸造合金		
88Cu-8Sn-4Zn	21~177	18.0
89Cu-11Sn	20~300	18.4
88Cu-6Sn-1.5Pb-4.5Zn	21~260	18.5
87Cu-8Sn-1Pb-4Zn	21~177	18.0
87Cu-10Sn-1Pb-2Zn	21~177	18.0
80Cu-10Sn-10Pb	21~204	18.5
78Cu-7Sn-15Pb	21~204	18.5
85Cu-5Sn-5Pb-5Zn	21~204	18.1
72Cu-1Sn-3Pb-24Zn	21~93	20.7
67Cu-1Sn-3Pb-29Zn	21~93	20.2
61Cu-1Sn-1Pb-37Zn	21~260	21.6
锰青铜		
60ksi	21~204	20.5
65ksi	21~93	21.6
110ksi	21~260	19.8
铝青铜		
合金9A	—	17
合金9B	20~250	17
合金9C，9D	—	16.2
铁与铁合金		
纯铁	20	11.7
Fe-C合金		
0.06%C	20~100	11.7
0.22%C	20~100	11.7
0.40%C	20~100	11.3
0.56%C	20~100	11.0
1.08%C	20~100	10.8

金属或合金	温度/℃	膨胀系数/[μin/(in·℃)]
铁与铁合金		
Fe-C合金		
1.45%C	20~100	10.1
镍铁(36%Ni)	20	2.0
13Mn-1.2C	20	18.0
13Cr-0.35C	20~100	10.0
12.3Cr-0.4Ni-0.09C	20~100	9.8
17.7Cr-9.6Ni-0.06C	20~100	16.5
18W-4Cr-1V	0~100	11.2
灰铸铁	0~100	10.5
可锻铸铁(珠光体)	20~400	12
铅与铅合金		
腐蚀铅(99.73+%Pb)	17~100	29.3
5-95软钎料	15~110	28.7
20-80软钎料	15~110	26.5
50-50软钎料	15~110	23.4
1%锑铅	20~100	28.8
硬铅		
96Pb-6Sb	20~100	28.8
94Pb-6Sb	20~100	27.2
8%锑铅	20~100	26.7
9%锑铅	20~100	26.4
铅基巴比特		
SAE14	20~100	19.6
合金8	20~100	24.0
镁与镁合金		
镁(99.8%)	20	25.2
铸造合金		
AM100A	18~100	25.2
AZ63A	20~100	26.1
AZ91A，B，C	20~100	26
AZ92A	18~100	25.2
HZ32A	20~200	26.7
ZH42	20~200	27
ZH62A	20~200	27.1
ZK51A	20	26.1

（续）

金属或合金	温度/℃	膨胀系数/[μin/(in·℃)]
镁与镁合金		
铸造合金		
EZ33A	20～100	26.1
EK30A，EK41A	20～100	26.1
锻造合金		
M1A，A3A	20～100	26
AZ31B，PE	20～100	26
AZ61A，AZ80A	20～100	26
ZK60A，B	20～100	26
HM31A	20～93	26.1
镍与镍合金		
镍(99.95%Ni+Co)	0～100	13.3
杜拉镍合金(Duranickel)	0～100	13.0
蒙乃尔镍铜合金(Monel)	0～100	14.0
蒙乃尔镍铜合金(Monel)(铸造)	25～100	12.9
铬镍铁(Inconel)	20～100	11.5
Ni-o-nel	27～93	12.9
哈氏镍基合金(Hastelloy)B	0～100	10.0
哈氏镍基合金(Hastelloy)C	0～100	11.3
哈氏镍基合金(Hastelloy)D	0～100	11.0
哈氏镍基合金(Hastelloy)F	20～100	14.2
哈氏镍基合金(Hastelloy)N	21～204	10.4
哈氏镍基合金(Hastelloy)W	23～100	11.3
哈氏镍基合金(Hastelloy)X	26～100	13.8
镍铬合金(Illium)G	0～100	12.19
镍铬合金(Illium)R	0～100	12.02
80Ni-20Cr	20～1000	17.3
60Ni-24Fe-16Cr	20～1000	17.0
35Ni-45Fe-20Cr	20～500	15.8
康铜(Constantan)	20～1000	18.8
锡与锡合金		
纯锡	0～100	23
软钎料		
70Sn-30Pb	15～110	21.6
63Sn-37Pb	15～110	24.7

金属或合金	温度/℃	膨胀系数/[μin/(in·℃)]
钛与钛合金		
99.9%Ti	20	8.41
99.0%Ti	93	8.55
Ti-5Al-2.5Sn	93	9.36
Ti-8Mn	93	8.64
锌与锌合金		
纯锌	20～250	39.7
AG40A 合金	20～100	27.4
AC41A 合金	20～100	27.4
商品轧制锌		
0.08Pb	20～40	32.5
0.3Pb，0.3Cd	20～98	33.9①
轧制锌合金，1Cu，0.010Mg	20～100	34.8②
Zn-Cu-Ti 合金，0.8Cu，0.15Ti	20～100	24.9③
纯　金　属		
铍	25～100	11.6
镉	20	29.8
钙	0～400	22.3
铬	20	6.2
钴	20	13.8
金	20	14.2
铱	20	6.8
锂	20	56
锰	0～100	22
钯	20	11.76
铂	20	8.9
铼	20～50	6.7
铑	20～100	8.3
钌	20	9.1
硅	0～1400	5
银	0～100	19.68
钨	27	4.6
钒	23～100	8.3
锆	—	5.85

①纵向，23.4 横向。　②纵向，21.1 横向。　③纵向，19.4 横向。

表 1.1-3　金属和合金的热导率

金属或合金	接近室温的热导率 /[cal/(cm·s·℃)]	金属或合金	接近室温的热导率 /[cal/(cm·s·℃)]
铝与铝合金		**铜与铜合金**	
锻压合金		**锻压铜**	
EC(O)	0.57	纯铜	0.941
1060(O)	0.56	电解韧铜(ETP)	0.934
1100	0.53	还原铜，高残留磷(DHP)	0.81
2011(T3)	0.34	易切削铜	
2014(O)	0.46	0.5% Te	0.88
2024(L)	0.45	1% Pb	0.92
2218(T72)	0.37	**锻造合金**	
3003(O)	0.46	镀饰铜，95%	0.56
4032(O)	0.37	商品青铜，90%	0.45
5005	0.48	首饰青铜，87.5%	0.41
5050(O)	0.46	红色黄铜，85%	0.38
5052(O)	0.33	低黄铜，80%	0.33
5056(O)	0.28	弹壳黄铜，70%	0.29
5083	0.28	黄色黄铜	0.28
5086	0.30	孟兹(锌铜)合金	0.29
5154	0.30	铅商品青铜	0.43
5357	0.40	低铅黄铜(管材)	0.28
5456	0.28	中铅黄铜	0.28
6061(O)	0.41	高铅黄铜(管材)	0.28
6063(O)	0.52	高铅黄铜	0.28
6101(T6)	0.52	超高铅黄铜	0.28
6151(O)	0.49	铅孟兹(锌铜)合金	0.29
7075(T6)	0.29	锻造黄铜	0.28
7079(T6)	0.29	建筑用青铜	0.29
7178	0.29	防腐蚀海军铜	0.26
铸造合金		海军黄铜	0.28
242.0(T77,砂)	0.36	铅海军黄铜	0.28
295.0(T4,砂)	0.33	锰青铜(A)	0.26
356.0(T51,砂)	0.40	磷青铜	
380.0(F,模具)	0.26	5%(A)	0.17
413.0(F,模具)	0.37	8%(C)	0.15
443.0(F,砂)	0.35	10%(D)	0.12
514.0(F,砂)	0.33	1.25%	0.49
520.0(T4,砂)	0.21	易切削磷青铜	0.18

（续）

金属或合金	接近室温的热导率 /[cal/(cm·s·℃)]
铜与铜合金	
锻造合金	
铜镍合金	
30%	0.07
10%	0.095
镍银	
65-18	0.08
55-18	0.07
65-12	0.10
高硅青铜(A)	0.09
低硅青铜(B)	0.14
铝青铜，5% Al	0.198
铝青铜(3)	0.18
铝硅青铜	0.108
铝青铜(1)	0.144
铝青铜(2)	0.091
铍铜	0.20①
铸造合金	
铬铜(1% Cr)	0.4①
89Cu-11Sn	0.121
88Cu-6Sn-1.5Pb-4.5Zn	②
87Cu-8Sn-1Pb-4Zn	③
87Cu-10Sn-1Pb-2Zn	③
80Cu-10Sn-10Pb	③
锰青铜，110ksi	④
铝青铜	
合金 9A	⑤
合金 9B	⑥
合金 9C	②
合金 9D	③
螺旋桨青铜	⑦
镍银	
12% Ni	⑧
16% Ni	⑧
20% Ni	⑨

金属或合金	接近室温的热导率 /[cal/(cm·s·℃)]
铜与铜合金	
铸造合金	
镍银	
25% Ni	⑩
硅青铜	⑧
铁与铁合金	
纯铁	0.178
铸铁(3.16C,1.54Si,0.57Mn)	0.112
碳钢	
0.23C，0.64Mn	0.124
1.22C，0.35Mn	0.108
合金钢(0.34C,0.55Mn,0.78Cr,3.53Ni,0.39Mo,0.05Cu)	0.079
410 号	0.057
304 号	0.036
T1 工具钢	0.058
铅与铅合金	
腐蚀铅(99.73+% Pb)	0.083
5-95 软钎料	0.085
20-80 软钎料	0.089
50-50 软钎料	0.111
1% 锑铅	0.080
硬铅	
96Pb-4Sb	0.073
94Pb-6Sb	0.069
8% 锑铅	0.065
9% 锑铅	0.064
铅基巴比特	
SAE14	0.057
合金 8	0.058
镁与镁合金	
镁(99.8%)	0.367
铸造合金	
AM100A	0.17
AZ63A	0.18

（续）

金属或合金	接近室温的热导率 /[cal/(cm·s·℃)]	金属或合金	接近室温的热导率 /[cal/(cm·s·℃)]
镁与镁合金		**镍与镍合金**	
铸造合金		35Ni-45Fe-20Cr	0.031
AZ81A(T4)	0.12	康铜(Constantan)	0.051
AZ91A，B，C	0.17	**锡与锡合金**	
AZ92A	0.17	纯锡	0.15
HK31A(T6,砂铸造)	0.22	软钎料(63Sn-37Pb)	0.12
HZ32A	0.26	锡箔(92Sn-8Zn)	0.14
ZH42	0.27	**钛与钛合金**	
ZH62A	0.26	钛(99.0%)	0.043
ZK51A	0.26	Ti-5Al-2.5Sn	0.019
ZE41A(T5)	0.27	Ti-2Fe-2Cr-2Mo	0.028
EZ33A	0.24	Ti-8Mn	0.026
EK30A	0.26	**锌与锌合金**	
EK41A(T5)	0.24	纯锌	0.27
锻压合金		AG40A 合金	0.27
M1A	0.33	AC41 合金	0.26
AZ31B	0.23	商品轧制锌	
AZ61A	0.19	0.08Pb	0.257
AZ80A	0.18	0.06Pb，0.06Cd	0.257
ZK60A，B(F)	0.28	轧制锌合金(1Cu,0.010Mg)	0.25
ZE10A(O)	0.33	Zn-Cu-Ti 合金(0.8Cu,0.15Ti)	0.25
HM21A(O)	0.33	**纯　金　属**	
HM31A	0.25	铍	0.35
镍与镍合金		镉	0.22
镍(99.95% Ni + Co)	0.22	铬	0.16
“A” 镍	0.145	钴	0.165
“D” 镍	0.115	锗	0.14
蒙乃尔镍铜合金(Monel)	0.062	金	0.71
蒙乃尔镍铜合金(“K”Monel)	0.045	铟	0.057
铬镍铁合金(Inconel)	0.036	铱	0.14
哈氏镍基合金(Hastelloy)B	0.027	锂	0.17
哈氏镍基合金(Hastelloy)C	0.03	钼	0.34
哈氏镍基合金(Hastelloy)D	0.05	铌	0.13
镍铬合金(Illium)G	0.029	钯	0.168
镍铬合金(Illium)R	0.031	铂	0.165
60Ni-24Fe-16Cr	0.032	钚	0.020

（续）

金属或合金	接近室温的热导率/[cal/(cm·s·℃)]	金属或合金	接近室温的热导率/[cal/(cm·s·℃)]
纯 金 属		纯 金 属	
铼	0.17	铊	0.093
铑	0.21	钍	0.090
硅	0.20	钨	0.397
银	1.0	铀	0.071
钠	0.32	钒	0.074
钽	0.130	钇	0.035

①取决于工艺。 ②w(Cu)=18%。 ③w(Cu)=12%。 ④w(Cu)=9.05%。 ⑤w(Cu)=15%。 ⑥w(Cu)=16%。 ⑦w(Cu)=11%。 ⑧w(Cu)=7%。 ⑨w(Cu)=6%。 ⑩w(Cu)=6.5%。

表1.1-4 金属和合金的电导率和电阻率

金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/(μΩ·cm)	金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/(μΩ·cm)
铝与铝合金			铜与铜合金		
1100(O)	59	2.9	锻压合金		
2024(O)	50	3.4	磷青铜，1.25%	48	3.6
3003(O)	50	3.4	镍银，55-18	5.5	31
4032(O)	40	4.3	低硅青铜(B)	12	14.3
5052(全部)	35	4.9	铍青铜	22～30①	5.7～7.8①
5056(O)	29	5.9	铸造合金		
6061(T6)	43	4.0	铬铜(1%Cr)	80～90①	2.10
6101(T6)	57	3.0	88Cu-8Sn-4Zn	11	15
7075(O)	45	3.8	87Cu-10Sn-1Pb-2Zn	11	15
7075(T6)	33	5.2	电接触材料		
铜与铜合金			铜合金		
锻压铜			0.04氧化物	100	1.72
纯铜	103.06	1.67	1.25Sn+P	48	3.6
电解韧铜(ETP)	101	1.71	5Sn+P	18	11
无氧铜(OF)	101	1.71	8Sn+P	13	13
易切削铜			15Zn	37	4.7
0.5%Te	95	1.82	20Zn	32	5.4
1.0%Pb	98	1.76	35Zn	27	6.4
锻压合金			2Be+Ni或Co②	17～21	9.6～11.5
弹壳黄铜，70%	28	6.2	银与银合金		
黄色黄铜	27	6.4	精银	104	1.59
铅商品青铜	42	4.1	92.5Ag-7.5Cu	88	2

（续）

金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/（μΩ · cm）
电接触材料		
银与银合金		
90Ag-10Cu	85	2
72Ag-28Cu	87	2
72Ag-26Cu-2Ni	60	2.9
85Ag-15Cd	35	4.93
97Ag-3Pt	45	3.5
97Ag-3Pd	58	2.9
90Ag-10Pd	27	5.3
90Ag-10Au	40	4.2
60Ag-40Pd	8	23
70Ag-30Pd	12	14.3
铂与铂合金		
铂	16	10.6
95Pt-5Ir	9	19
90Pt-10Ir	7	25
85Pt-15Ir	6	28.5
80Pt-20Ir	5.6	31
75Pt-25Ir	5.5	33
70Pt-30Ir	5	35
65Pt-35Ir	5	36
95Pt-5Ru	5.5	31.5
90Pt-10Ru	4	43
89Pt-11Ru	4	43
86Pt-14Ru	3.5	46
96Pt-4W	5	36
钯与钯合金		
钯	16	10.8
95.5Pd-45Ru	7	24.2
90Pd-10Ru	6.5	27
70Pd-30Ag	4.3	40
60Pd-40Ag	4.0	43
50Pd-50Ag	5.5	31.5
72Pd-26Ag-1.71-2Ni	4	43
60Pd-40Cu	5	35[3]
45Pd-30Ag-20Au-5Pt	4.5	39

金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/（μΩ · cm）
电接触材料		
钯与钯合金		
35Pd-30Ag-14Cu-10Pt-10Au-1Zn	5	35
金与金合金		
金	75	2.35
90Au-10Cu	16	10.8
75Au-25Ag	16	10.8
72.5Au-14Co-8.5Pt-4Ag-1Zn	10	17
69Au-25Ag-6Pt	11	15
41.7Au-32.5Cu-18.8Ni-7Zn	4.5	39
电加热合金		
Ni-Cr 和 Ni-Cr-Fe 合金		
78.5Ni-20Cr-1.5Si(80-20)	1.6	108.05
73.5Ni-20Cr-5Al-1.5Si	1.2	137.97
68Ni-20Cr-8.5Fe-2Si	1.5	116.36
60Ni-16Cr-22.5Fe-1.5Si	1.5	112.20
35Ni-20Cr-43.5Fe-1.5Si	1.7	101.4
Fe-Cr-Al 合金		
72Fe-23Cr-5Al	1.3	138.8
55Fe-37.5Cr-7.5Al	1.2	166.23
纯金属		
钼	34	5.2
铂	16	10.64
钽	13.9	12.45
钨	30	5.65
非金属加热元件材料		
碳化硅（SiC）	1～1.7	100～200
二硅化钼（$MoSi_2$）	4.5	37.24
石墨	—	910.1
仪器与控制用合金		
Cu-Ni 合金		
98Cu-2Ni	35	4.99
94Cu-6Ni	17	9.93
89Cu-11Ni	11	14.96
78Cu-22Ni	5.7	29.92

（续）

金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/(μΩ·cm)
仪器与控制用合金		
Cu-Ni 合金		
55Cu-4SNi(康铜)	3.5	49.87
Cu-Mn-Ni 合金		
87Cu-13Mn(锰铜)	3.5	48.21
83Cu-13Mn-4Ni(锰铜)	3.5	48.21
85Cu-10Mn-4Ni(磁分路锰铜)	4.5	38.23
70Cu-20Ni-10Mn	3.6	48.88
67Cu-SNi-27Mn	1.8	99.74
镍基合金		
99.8Ni	23	7.98
71Ni-29Fe	9	19.95
80Ni-20Cr	1.5	112.2
7SNi-20Cr-3Al + Co 或 Fe	1.3	132.98
76Ni-17Cr-4Si-3Mn	1.3	132.98
60Ni-16Cr-24Fe	1.5	112.2
35Ni-20Cr-45Fe	1.7	101.4
Fe-Cr-Al 合金		
72Fe-23Cr-5Al-0.5Co	1.3	135.48
纯金属		
铁(99.99%)	17.75	9.71
双 金 属		
75Fe-22Ni-3Cr	3	78.13
72Mn-18Co-10Ni	1.5	112.2
67Ni-30Cu-1.4Fe-1Mn	3.5	56.52
75Fe-22Ni-3Cr	12	15.79
66.5Fe-22Ni-8.5Cr	3.3	58.18
永 磁 材 料		
碳钢		
0.65%C	9.5	18
1%C	8	20
铬钢，3.5%Cr	6.1	29
11	15	30
钴钢		
17%Co	6.3	28
36%Co	6.5	27
永 磁 材 料		
中间体合金		
铜镍钴磁合金(Cunico)	7.5	24
铜镍铁合金(Cunife)	9.5	18
钴钼(Comol)	3.6	45
阿尔尼科铝镍钴合金 Alnico 合金		
阿尔尼科铝镍钴合金(Alnico)Ⅰ	3.3	75
阿尔尼科铝镍钴合金(Alnico)Ⅱ	3.3	65
阿尔尼科铝镍钴合金(Alnico)Ⅲ	3.3	60
阿尔尼科铝镍钴合金(Alnico)Ⅳ	3.3	75
阿尔尼科铝镍钴合金(Alnico)Ⅴ	3.5	47
阿尔尼科铝镍钴合金(Alnico)Ⅵ	3.5	50
软 磁 材 料		
电工薄钢板		
M-50	9.5	18
M-43	6~9	20~28
M-36	5.5~7.5	24~33
M-27	3.5~5.5	32~47
M-22	3.5~5	41~52
M-19	3.5~5	41~56
M-17	3~3.5	45~58
M-15	3~3.5	45~69
M-14	3~3.5	58~69
M-7	3~3.5	45~52
M-6	3~3.5	45~52
M-5	3~3.5	45~52
中高磁导率材料④		
萨美诺尔铁素体(Thermenol)	0.5	162
阿尔费诺铝铁(16Alfenol)	0.7	153
铁镍(Sinimax)	2	90
钼镍铁(Monimax)	2.5	80
镍铁钼(Supermalloy)	3	65
钨钼(4-79Moly Permalloy, Hymu 80)	3	58
镍铁(Mumetal)	3	60
1040 合金	3	56

（续）

金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/（μΩ·cm）	金属或合金	电导率 %IACS	电阻率/（μΩ·cm）
软磁材料			**退火后的转化钢和合金**		
中高磁导率材料④			**不锈钢**		
高坡莫合金（High Permalloy49，A-L4750），阿姆科（Armco）48	3.6	48	410号	3	57
			416号	3	57
坡莫合金（45 Permalloy）	3.6	45	430号	3	60
高磁导率材料⑤			443号	3	68
铁钴钒（Supermendur）	4.5	40	446号	3	61
铁钴波明德（2V Permendur）	4.5	40	**镍铁**		
35%Co，1%Cr	9	20	50%Ni	3.5	48
锭铁（工业纯铁）	17.5	10	78%Ni	11	16
0.5%Si钢	6	28	77%Ni（Cu，Cr）	3	60
1.75%Si钢	4.6	37	79%Ni（Mo）	3	58
3.0%Si钢	3.6	47	**不锈钢和耐热合金**		
晶粒取向3.0%Si钢	3.5	50	302号	3	72
晶粒取向50%Ni铁	3.6	45	309号	2.5	78
50%Ni铁	3.5	50	316号	2.5	74
退火后的转化钢和合金			317号	2.5	74
低碳铁与钢			347号	2.5	73
低碳铁	17.5	10	403号	3	57
1010钢	14.5	12	405号	3	60
硅钢			501号	4.5	40
1%Si	7.5	23	HH	2.5	80
2.5%Si	4	41	HK	2	90
3%Si	3.5	48	HT	1.7	100
3%Si，晶粒取向	3.5	48			
4%Si	3	59			

①析出硬化，取决于工艺。 ②一种热处理合金。 ③退火和淬火。 ④在低场强和高电阻的情况下。 ⑤在较高场强里退火，旨在优化磁学性能。

表1.1-5 金属和合金的近似熔点

金属或合金	温度		金属或合金	温度	
	℃	℉		℃	℉
铝与铝合金			**铝与铝合金**		
锻造合金			**锻造合金**		
1100	655	1215	6061	650	1205
2017	640	1185	7075	635	1175
Alclad 2024	635	1180	**铸造合金**		
3003	655	1210	242.0	635	1175
5052	650	1200	295.0	645	1190

（续）

金属或合金	温度	
	℃	℉
铝与铝合金		
铸造合金		
336.0	565	1050
A380.0	595	1100
413.0	580	1080
B443.0	630	1170
514.0	640	1185
520.0	605	1120
铜与铜合金		
锻造铜与铜合金		
纯铜	1080	1980
铍铜		
1.7%Be，0.25%Co	870～980	1600～1800
1.9%Be，0.25%Co	870～980	1600～1800
红色黄铜，15%Zn	1025	1880
弹壳黄铜，30%Zn	955	1750
黄色黄铜	930	1710
孟兹(锌铜)合金	905	1660
海军黄铜 Admiralty brass	940	1720
海军黄铜	900	1650
磷青铜		
5%Sn	1050	1920
10%Sn	1000	1830
铝青铜，7%Al，2.5%Fe	1045	1915
高硅青铜，3.3%Si	1025	1880
铜镍		
10%Ni	1150	2100
21%Ni	1150～1200	2100～2190
30%Ni	1240	2260
镍银		
72-18	1150	2100
65-18	1110	2030
55-18	1055	1930
铸造合金		
85Cu-5Zn-5Sn-5Pb	1005	1840
G青铜，10%Sn，2%Zn	980	1800
M青铜，8.5%Sn，4%Zn	1000	132
83Cu-7Sn-7Pb-3Zn	980	1800

金属或合金	温度	
	℃	℉
铜与铜合金		
铸造合金		
镍锡青铜(A)	1025	1880
镍锡青铜(B)	1025	1880
镍铝青铜	1045～1060	1910～1940
铜镍		
10%Ni	1150	2100
30%Ni	1240	2260
镍银		
12%Ni	1000	1830
20%Ni	1145	2090
25%Ni	1045	1910
低熔点金属和合金		
55.5Bi-44.5Pb	125	255
58Bi-42Sn	138	281
50Bi-26.7Pb-13.3Sn-10Cd	70	158
44.7Bi-22.6Pb-19.1In-5.3Cd-8.3Sn	47	117
铅，99.9%最小Pb	327	621
锑铅，10%Sb	285	545
碲铅，0.04%Te，0.06%Cu	327	621
50-50铅锡软钎料	216	421
60-40铅锡软钎料	190	374
Tin，99.8%最小Sn	232	449
锌与锌合金		
轧制锌		
0.08%Pb	419	786
1%Cu，0.01%Mg	422	792
AG40A	387	728
AC41A	386	727
镁与镁合金		
铸造合金		
AZ91B	595	1105
AZ91C	595	1105
AZ92A	593	1100
EZ33A	643	1189
HZ32A	648	1198
锻造合金		
AZ31B	630	1170

（续）

金属或合金	温度 ℃	温度 ℉
镁与镁合金		
锻造合金		
AZ80A	610	1130
HK31A	651	1204
ZK60A	635	1175
钛与钛合金		
非合金钛		
ASTM 级别 1	1683	3063
ASTM 级别 2	1704	3100
ASTM 级别 4	1670	3038
Ti-0.2Pd	1704	3100
Ti-5Al-2.5Sn	1650	3002
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	1650	3000
Ti-6Al-6V-2Sn	1705	3100
Ti-6Al-4V	1650	3000
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	1675	3050
镍与镍合金		
低合金镍和镍铜		
镍 200，201，和 205，99.5%最小 Ni	1445	2635
镍 211，95% Ni，4.9% Mo，0.1% C	1425	2600
镍 270，99.98%最小 Ni	1455	2650
杜拉尼科(Duranickel)301	1440	2620
镍铍，2.7% Be	1265	2310
蒙乃尔合金(Monel alloy)400	1350	2460
蒙乃尔合金(Monel alloy)R-405	1350	2460
蒙乃尔合金(Monel alloy)K-500	1350	2460
蒙乃尔("S"Monel)(铸造)	1290	2350
镍铬铁合金		
因康镍合金(Inconel alloy)600	1415	2575
因康镍合金(Inconel alloy)601	1370	2494
因康镍合金(Inconel alloy)617	1375	2510
因康镍合金(Inconel alloy)625	1350	2460
因康镍合金(Inconel alloy)690	1375	2510
因康镍合金(Inconel alloy)718	1335	2437
镍与镍合金		
镍铬铁合金		
因康镍合金(Inconelalloy)X-750	1425	2600
因康镍合金(Inconel alloy)751	1425	2600
镍铬合金		
尼孟(因康)合金(Nimonic alloy)75	1380	2515
尼孟(因康)合金(Nimonic alloy)80A	1370	2500
尼孟(因康)合金(Nimonic alloy)90	1370	2500
尼孟(因康)合金(Nimonic alloy)115	1315	2400
镍铬钼合金		
哈氏镍基合金(Hastelloy alloy)C-276	1370	2500
哈氏镍基合金(Hastelloy alloy)G	1345	2450
哈氏镍基合金(Hastelloy alloy)N	1400	2550
哈氏镍基合金(Hastelloy alloy)S	1380	2516
哈氏镍基合金(Hastelloy alloy)W	1315	2400
哈氏镍基合金(Hastelloy alloy)X	1355	2470
克罗利麦特合金(Chlorimet)2 和 3	1315	2400
高温高强度合金		
耐热镍铬铁合金(Incoloy alloy)800	1385	2525
耐热镍铬铁合金(Incoloy alloy)801	1385	2525
耐热镍铬铁合金(Incoloy alloy)802	1370	2500
耐热镍铬铁合金(Incoloy alloy)825	1400	2550
合金 713C(铸造)	1290	2350
合金 713LC	1320	2410
A-286	1400	2550
IN-100	1335	2435
IN-102	1290	2350

（续）

金属或合金	温度		金属或合金	温度	
	℃	℉		℃	℉
高温高强度合金			**锻造不锈钢**		
IN-738	1230~1315	2250~2400	304 号	1400~1450	2550~2650
IN-939	1230~1340	2255~2444	316 号	1375~1400	2500~2550
合金 25(L-605)	1410	2570	405 号	1480~1530	2700~2790
合金 188	1330	2425	409 号	1480~1530	2700~2790
MAR-M246	1355	2475	420 号	1450~1510	2650~2750
M-252	1370	2500	430 号	1425~1510	2600~2750
(雷内系列)镍基高温合金(René) 41	1370	2500	440C 号	1370~1480	2500~2700
			446 号	1425~1510	2600~2750
TD 镍	1455	2650	17-4PH	1400~1440	2560~2625
时效硬化镍基合金(Udimet alloy)500	1395	2540	AM350	1400	2550
			铸造不锈钢		
时效硬化镍基合金(Udimet alloy)700	1400	2550	**防腐蚀合金**		
			CA-15	1510	2750
沃斯帕洛依镍基合金(Waspaloy)	1355	2475	CA-40	1495	2725
B-1900	1300	2375	CB-7Cu-1	1510	2750
耐热合金钢(Multimetalloy)N-155	1355	2470	CF-8	1425	2600
透平叶片用镍铬钼钛合金钢(Discaloy)	1465	2665	CF-3M	1400	2550
			CF-20	1415	2575
铁与钢			CH-20	1425	2600
铁			CN-7M	1455	2650
锭铁(工业纯铁)	1535	2795	**耐热合金**		
锻压铁	1510	2750	HA	1510	2750
灰铸铁	1175	2150	HC	1495	2725
可锻铸铁	1230	2250	HD	1480	2700
球墨铸铁	1175	2150	HE	1455	2650
Ni-防腐(155-35% Ni)	1230	2250	HF	1400	2550
(耐酸)硅铁 Duriron(14.5% Si)	1260	2300	HH	1370	2500
钢			HK	1400	2550
碳钢(SAE1020)	1515	2760	HL	1425	2600
4340 钢	1505	2740	HN	1370	2500
9% Ni 钢	1500	2730	HP，HT 和 HU	1345	2450
高镍合金钢(18Ni-200)	1455	2650	HW 和 HX	1290	2350
锻造不锈钢			**耐熔金属和合金**		
201 号	1400~1450	2550~2650	铌	2470	4475

（续）

金属或合金	温度 ℃	温度 ℉	金属或合金	温度 ℃	温度 ℉
耐熔金属和合金			**贵重金属和合金**		
Nb-1Zr	2400	4350	银(99.9%最小 Ag)	961	1761
钼	2610	4730	BAg-1(硬钎焊合金)	635	1175
Mo-0.5Ti	2610	4730	铂	1791	3256
钽	2995	5425	钯	1552	2826
钨	3410	6170	铱	2443	4429
W-25Re	3100	5612	铑	1960	3560
W-50Re	2550	4622	90Pt-10Ir	1782	3240
贵重金属和合金			60Pd-40Ag	1338	2440
金(99.995%最小 Au)	1063	1945			

表1.1-6　普通气体和液体的物理性质

名称 中文	名称 英文	分子式	分子量	密度/(g/L)①	熔点/℃	沸点/℃	自燃点/℃	爆炸极限(单位空气体积百分比,%) 下	爆炸极限(单位空气体积百分比,%) 上
乙炔	Acetylene	C_2H_2	26.04	1.173	-81	-83.6subl.③	335	2.5	80.0
空气	Air	—	28.97②	1.2929	—	—	—	—	—
氨	Ammonia	NH_3	17.03	0.7710	-77.7	-33.4	780	16.0	27.0
氩	Argon	Ar	39.94	1.784	-189.2	-185.7	—	—	—
丁烷-n	Butane-n	C_4H_{10}	58.12	2.703	-138	-0.6	430	1.6	8.5
丁烷-i	Butane-i	C_4H_{10}	58.12	2.637	-159	-11.7	—	—	—
丁烯-n	Butylene-n	C_4H_8	56.10	2.591	-185	-6.3	—	1.7	9.0
二氧化碳	Carbon dioxide	CO_2	44.01	1.977	-57(5个大气压)	-78.5subl.③	—	—	—
一氧化碳	Carbon monoxide	CO	28.01	1.250	-207	-191	650	12.5	74.2
氯	Chlorine	Cl_2	70.91	3.214	-101	-34	—	—	—
乙烷	Ethane	C_2H_6	30.07	1.356	-172	-88.6	510	3.1	15.0
乙烯	Ethylene	C_2H_4	28.05	1.261	-169	-103.7	543	3.0	34.0
氦	Helium	He	4.003	0.1785	-272	-268.9	—	—	—
庚烷-n	Heptane-n	C_7H_{16}	100.20	0.684g/cm³	-90.6	98.4	233	1.0	6.0
己烷-n	Hexane-n	C_6H_{14}	86.17	0.6594g/cm³	-95.3	68.7	248	1.2	6.9
氢	Hydrogen	H_2	2.016	0.0899	-259.2	-252.8	580	4.1	74.2
氯化氢	Hydrogen chloride	HCl	36.47	1.639	-112	-84	—	—	—

（续）

名称		分子式	分子量	密度/(g/L)①	熔点/℃	沸点/℃	自燃点/℃	爆炸极限(单位空气体积百分比,%)	
中文	英文							下	上
氟化氢	Hydrogen fluoride	HF	20.01	0.921	-92.3	19.5	—	—	—
硫化氢	Hydrogen sulfide	H_2S	34.08	1.539	-84	-62	—	4.3	45.5
甲烷	Methane	CH_4	16.04	0.7168	-182.5	-161.5	538	5.3	13.9
氮	Nitrogen	N_2	28.016	1.2506	-209.9	-195.8	—	—	—
辛烷-n	Octane-n	C_8H_{18}	114.23	0.7025g/cm³	-56.8	125.7	232	0.8	3.2
氧	Oxygen	O_2	32.00	1.4290	-218.4	-183.0	—	—	—
戊烷-n	Pentane-n	C_5H_{12}	72.15	0.016g/cm³	-131	36.2	310	1.4	8.0
丙烷	Propane	C_3H_8	44.09	2.020	-189	-44.5	465	2.4	9.5
丙烯	Propylene	C_3H_6	42.05	1.915	-184	-48	458	2.0	11.1
二氧化硫	Sulfur dioxide	SO_2	64.06	2.926	-75.7	-10.0	—	—	—

①气体的密度是 g/L，并在 0℃和 760mm Hg(1 个大气压)下。 ②因为空气是一混合物，故没有分子量。这是其组分的平均分子量。 ③Subl 表示物质在所列温度下的蒸发。

引自 *Corrossion Test and Standar: Application and Interpretation*, ASTM, 1995, p27。

表 1.1-7 非奥氏体钢的近似当量硬度值(洛氏 C 硬度范围)①

洛氏 C 硬度值(150kgf) HRC	维氏硬度值 HV	布氏硬度值		努氏硬度值(≥500kgf) HK	洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			肖氏硬度值	洛氏 C 抗拉强度 ≈/ksi
		10mm 标准球(3000kgf) HBS	10mm 硬质合金球(3000kgf) HBW		A 标尺(60kgf) HRA	D 标尺(60kgf) HRD	15-N 标尺(15kgf) HR15N	30-N 标尺(30kgf) HR30N	45-N 标尺(45kgf) HR45N		
68	940	—	—	920	85.6	76.9	93.2	894.4	75.4	97.3	—
67	900	—	—	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	—
66	865	—	—	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	—
65	832	—	(739)	846	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	—
64	800	—	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	—
63	772	—	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	—
62	746	—	(688)	776	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	—
61	720	—	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	—
60	697	—	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	—
59	674	—	(634)	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	351
58	653	—	615	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	338
57	633	—	595	670	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	325

（续）

洛氏C硬度值(150kgf) HRC	维氏硬度值 HV	布氏硬度值 10mm标准球(3000kgf) HBS	布氏硬度值 10mm硬质合金球(3000kgf) HBW	努氏硬度值(≥500kgf) HK	洛氏硬度值 A标尺(60kgf) HRA	洛氏硬度值 D标尺(60kgf) HRD	洛氏表面硬度值 15-N标尺(15kgf) HR15N	洛氏表面硬度值 30-N标尺(30kgf) HR30N	洛氏表面硬度值 45-N标尺(45kgf) HR45N	肖氏硬度值	洛氏C抗拉强度≈/ksi
56	613	—	577	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	313
55	595	—	560	630	68.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	301
54	577	—	543	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	292
53	560	—	525	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	283
52	544	(500)	512	576	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	273
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	264
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	255
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	246
48	484	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	238
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	229
46	458	432	432	480	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	221
45	446	421	421	466	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	215
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	208
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	201
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	194
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	188
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	182
39	382	362	362	391	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	177
38	372	353	353	380	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	171
37	363	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.6	49.3	166
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	161
35	345	327	327	351	67.9	51.5	77.7	55.0	37.2	47.1	156
34	336	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	152
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	149
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	146
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	141
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	138
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	135
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	131
27	279	264	264	290	63.8	45.2	73.3	47.7	27.8	39.5	128
26	272	258	258	284	63.3	44.6	72.8	46.8	26.7	38.7	125
25	266	253	253	278	62.3	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	123

（续）

洛氏C硬度值(150kgf) HRC	维氏硬度值 HV	布氏硬度值		努氏硬度值(≥500kgf) HK	洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			肖氏硬度值	洛氏C抗拉强度 ≈ /ksi
		10mm标准球(3000kgf) HBS	10mm硬质合金球(3000kgf) HBW		A标尺(60kgf) HRA	D标尺(60kgf) HRD	15-N标尺(15kgf) HR15N	30-N标尺(30kgf) HR30N	45-N标尺(45kgf) HR45N		
24	260	247	247	272	62.4	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	119
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	117
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.5	115
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	112
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	110

注：括号里的值超出正常范围，仅供参考。

①适用于退火、正火、调质状态下的碳钢和合金钢。

引自 ASTM E140。

表1.1-8 非奥氏体钢的近似当量硬度值（洛氏B硬度范围）①

洛氏B硬度值(100kgf) HRB	维氏硬度值 HV	布氏硬度值(3000kgf) HBS	努氏硬度值(500gf) HK	洛氏A硬度值(60kgf) HRA	洛氏F硬度值(60kgf) HRF	洛氏表面硬度值			抗拉强度 ≈ /ksi
						15-T标尺(15kgf) HR15T	30-T标尺(30kgf) HR30T	45-T标尺(45kgf) HR45T	
100	240	240	251	61.5	—	93.1	83.1	72.9	116
99	234	234	246	60.9	—	92.8	82.5	71.9	114
98	228	228	241	60.2	—	92.5	81.8	70.9	109
97	222	222	236	59.5	—	92.1	81.1	69.9	104
96	216	216	231	58.9	—	91.8	80.4	68.9	102
95	210	210	226	58.3	—	91.5	79.8	67.9	100
49	205	205	221	57.6	—	91.2	79.1	66.9	98
93	200	200	216	57.0	—	90.8	78.4	65.9	94
92	195	195	211	56.4	—	90.5	77.8	64.8	92
91	190	190	206	55.8	—	90.2	77.1	63.8	90
90	185	185	201	55.2	—	89.9	76.4	62.8	89
89	180	180	196	54.6	—	89.5	75.8	61.8	88
88	176	176	192	54.0	—	89.2	75.1	60.8	86
87	172	172	188	53.4	—	88.9	74.4	59.8	84
86	169	169	184	52.8	—	88.6	73.8	58.8	83
85	165	165	180	52.3	—	88.2	73.1	57.8	82
84	162	162	176	51.7	—	87.9	72.4	56.8	81
83	159	159	173	51.1	—	87.6	71.8	55.8	80
82	156	156	170	50.6	—	87.3	71.1	54.8	77

（续）

洛氏B硬度值(100kgf) HRB	维氏硬度值 HV	布氏硬度值(3000kgf) HBS	努氏硬度值(500gf) HK	洛氏A硬度值(60kgf) HRA	洛氏F硬度值(60kgf) HRF	洛氏表面硬度值 15-T标尺(15kgf) HR15T	洛氏表面硬度值 30-T标尺(30kgf) HR30T	洛氏表面硬度值 45-T标尺(45kgf) HR45T	抗拉强度≈/ksi
81	153	153	167	50.0	—	86.9	70.4	53.8	73
80	150	150	164	49.5	—	86.6	69.7	52.8	72
79	147	147	161	48.9	—	86.3	69.1	51.8	70
78	144	144	158	48.4	—	86.0	68.4	50.8	69
77	141	141	155	47.9	—	85.6	67.7	49.8	68
76	139	139	152	47.3	—	85.3	67.1	48.8	67
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	66
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	65
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	64
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	63
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	62
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	61
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	60
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	59
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	58
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	57
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	56
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	—
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	—
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	—
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	—
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	—
59	106	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	—
58	104	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	—
57	103	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	—
56	101	101	114	37.7	88.8	78.8	53.7	28.7	—
55	100	100	112	37.2	88.2	78.5	50.0	27.7	—
54	—	—	111	36.8	87.7	78.2	52.4	26.7	—
53	—	—	110	36.3	87.1	77.9	51.7	25.7	—
52	—	—	109	35.9	86.5	77.5	51.0	24.7	—
51	—	—	108	35.5	86.0	77.2	50.3	23.7	—
50	—	—	107	35.0	85.4	76.9	49.7	22.7	—
49	—	—	106	34.6	84.8	76.6	49.0	21.7	—

（续）

洛氏B硬度值(100kgf) HRB	维氏硬度值 HV	布氏硬度值(3000kgf) HBS	努氏硬度值(500gf) HK	洛氏A硬度值(60kgf) HRA	洛氏F硬度值(60kgf) HRF	洛氏表面硬度值			抗拉强度≈/ksi
						15-T标尺(15kgf) HR15T	30-T标尺(30kgf) HR30T	45-T标尺(45kgf) HR45T	
48	—	—	105	34.1	84.3	76.2	48.3	20.7	—
47	—	—	104	33.7	83.7	75.9	47.7	19.7	—
46	—	—	103	33.3	83.1	75.6	47.0	18.7	—
45	—	—	102	32.9	82.6	75.3	46.3	17.7	—
44	—	—	101	32.4	82.0	74.9	45.7	16.7	—
43	—	—	100	32.0	81.4	74.6	45.0	15.7	—
42	—	—	99	31.6	80.8	74.3	44.3	14.7	—
41	—	—	98	31.2	80.3	74.0	43.7	13.6	—
40	—	—	97	30.7	79.7	73.6	43.0	12.6	—
39	—	—	96	30.3	79.1	73.3	42.3	11.6	—
38	—	—	95	29.9	78.6	73.0	41.0	10.6	—
37	—	—	94	29.5	78.0	72.7	41.0	9.6	—
36	—	—	93	29.1	77.4	72.3	40.3	8.6	—
35	—	—	92	28.7	76.9	72.0	39.6	7.6	—
34	—	—	91	28.2	76.3	71.7	39.0	6.6	—
33	—	—	90	27.8	75.7	71.4	38.3	5.6	—
32	—	—	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	—
31	—	—	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	—
30	—	—	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	—

①适用于退火、正火、调质状态下的碳钢和合金钢。

引自：ASTM E140。

表1.1-9 奥氏体不锈钢薄板的近似当量硬度值(洛氏C硬度范围)①

洛氏硬度值		洛氏表面硬度值		
C标尺(150kgf)金刚石压头 HRC	A标尺(60kgf)金刚石压头 HRA	15-N标尺(15kgf)表面金刚石压头 HR15N	30-N标尺(30kgf)表面金刚石压头 HR30N	45-N标尺(45kgf)表面金刚石②压头 HR45N
48	74.4	84.1	66.2	52.1
47	73.9	83.6	65.3	50.9
46	73.4	83.1	64.5	49.8
45	72.9	82.6	63.6	48.7
44	72.4	82.1	62.7	47.5
43	71.9	81.6	61.8	46.4
42	71.4	81.0	61.0	45.2

（续）

洛氏硬度值		洛氏表面硬度值		
C标尺(150kgf)金刚石压头HRC	A标尺(60kgf)金刚石压头HRA	15-N标尺(15kgf)表面金刚石压头HR15N	30-N标尺(30kgf)表面金刚石压头HR30N	45-N标尺(45kgf)表面金刚石[2]压头HR45N
41	70.9	80.5	60.1	44.1
40	70.4	80.0	59.2	43.0
39	69.9	79.5	58.4	41.8
38	69.3	79.0	57.5	40.7
37	68.8	78.5	56.6	39.6
36	68.3	78.0	55.7	38.4
35	67.8	77.5	54.9	37.3
34	67.3	77.0	54.0	36.1
33	66.8	76.5	53.1	35.0
32	66.3	75.9	52.3	33.9
31	65.8	75.4	51.4	32.7
30	65.3	74.9	50.5	31.6
29	64.8	74.4	49.6	30.4
28	64.3	73.9	48.8	29.3
27	63.8	73.4	47.9	28.2
26	63.3	72.9	47.0	27.0
25	62.8	72.4	40.2	25.9
24	62.3	71.9	45.3	24.8
23	61.8	71.3	44.4	23.6
22	61.3	70.8	43.5	22.5
21	60.8	70.3	42.7	21.3

①适用于201、202、301、302、304、304L、305、316、316L、321和347号钢。对于301号钢，回火范围从退火到超硬；对于其余的钢号，则范围较小。试件厚度为0.050～0.1in(1.27～2.5mm)。　②原文中无“金刚石”一词，疑为原书漏排，故加上。——译者注。

引自：ASTM E140。

表1.1-10　奥氏体不锈钢薄板的近似当量硬度值(洛氏B硬度范围)[1]

洛氏硬度值			洛氏表面硬度值		
B标尺(100kgf) 1/16in(1.588mm)球 HRB	A标尺(60kgf) 金刚石压头 BRA	F标尺(60kgf) 1/16in(1.588mm)球 HRF	15-T标尺(15kgf) 1/16in(1.588mm)球 HR15T	30-T标尺(30kgf) 1/16in(1.588mm)球 HR30T	45-T标尺(45kgf) 1/16in(1.588mm)球 HR45T
100	61.5	(113.9)	91.5	80.4	70.2
99	60.9	(113.2)	91.2	79.7	69.2
98	60.3	(112.5)	90.8	79.0	68.2
97	59.7	(111.8)	90.4	78.3	67.2

（续）

洛氏硬度值			洛氏表面硬度值		
B标尺(100kgf) 1/16in(1.588mm)球 HRB	A标尺(60kgf) 金刚石压头 BRA	F标尺(60kgf) 1/16in(1.588mm)球 HRF	15-T标尺(15kgf) 1/16in(1.588mm)球 HR15T	30-T标尺(30kgf) 1/16in(1.588mm)球 HR30T	45-T标尺(45kgf) 1/16in(1.588mm)球 HR45T
96	59.1	(111.1)	90.1	77.7	66.1
95	58.5	(110.5)	89.7	77.0	65.1
94	58.0	(109.8)	89.3	76.3	64.1
93	57.4	(109.1)	88.9	75.6	63.1
92	56.8	(108.4)	88.6	74.9	62.1
91	56.2	(107.8)	88.2	74.2	61.1
90	55.6	(107.1)	87.8	73.5	60.1
89	55.0	(106.4)	87.5	72.8	59.0
88	54.5	(105.7)	87.1	72.1	58.0
87	53.9	(105.0)	86.7	71.4	57.0
86	53.3	(104.4)	86.4	70.7	56.0
85	52.7	(103.7)	86.0	70.0	55.0
84	52.1	(103.0)	85.6	69.3	54.0
83	51.5	(102.3)	85.2	68.6	52.9
82	50.9	(101.7)	84.9	67.9	51.9
81	50.4	(101.0)	84.5	67.2	50.9
80	49.8	(100.3)	84.1	66.5	49.9
79	49.2	99.6	83.8	65.8	48.9
78	48.6	99.0	83.4	65.1	47.9
77	48.0	98.3	83.0	64.4	46.8
76	47.4	97.6	82.6	63.7	45.8
75	46.9	96.9	82.3	63.0	44.8
74	46.3	96.2	81.9	62.4	43.8
73	45.7	95.6	81.5	61.7	42.8
72	45.1	94.9	81.2	61.0	41.8
71	44.5	94.2	80.8	60.3	40.7
70	43.9	93.5	80.4	59.6	39.7
69	43.3	92.8	80.1	58.9	38.7
68	42.8	92.2	79.7	58.2	37.7
67	42.2	91.5	79.3	57.5	36.7
66	41.6	90.8	78.9	56.8	35.7
65	41.0	90.1	78.6	56.1	34.7
64	40.4	89.5	78.2	55.4	33.6

（续）

洛氏硬度值			洛氏表面硬度值		
B标尺(100kgf) $\frac{1}{16}$in(1.588mm)球 HRB	A标尺(60kgf) 金刚石压头 BRA	F标尺(60kgf) $\frac{1}{16}$in(1.588mm)球 HRF	15-T标尺(15kgf) $\frac{1}{16}$in(1.588mm)球 HR15T	30-T标尺(30kgf) $\frac{1}{16}$in(1.588mm)球 HR30T	45-T标尺(45kgf) $\frac{1}{16}$in(1.588mm)球 HR45T
63	39.8	88.8	77.8	54.7	32.6
62	39.3	88.1	17.5	54.0	31.6
61	38.7	87.4	77.1	53.3	30.6
60	38.1	86.8	76.7	52.6	29.6

注：括号里的洛氏F值超出正常范围，仅供参考。

①适用于201、202、301、302、304、304L、305、316、316L、321和347号钢。对于301号钢，回火范围从退火到超硬；对于其余的钢号，则范围较小。试件厚度为0.050～0.1in(1.27～2.5mm)。

引自：ASTM E140。

表1.1-11 退火状态下奥氏体不锈钢中厚板的布氏-洛氏B近似当量硬度值

洛氏硬度值 B标尺 (100kgf, 1.558mm球) HRB	布氏硬度值 (3000kgf,10mm钢球) HBS (现行国家标准(GB)中已无HBS的试验方法。——译者注)	洛氏硬度值 B标尺 (100kgf, 1.558mm球) HRB	布氏硬度值 (3000kgf,10mm钢球) HBS (现行国家标准(GB)中已无HBS的试验方法。——译者注)
100	256	79	150
99	248	78	147
98	240	77	144
97	233	76	142
96	226	75	139
95	219	74	137
94	213	73	135
93	207	72	132
92	202	71	130
91	197	70	128
90	192	69	126
89	187	68	124
88	183	67	122
87	178	66	120
86	174	65	118
85	170	64	116
84	167	63	114
83	163	62	113
82	160	61	111
81	156	60	110
80	153		

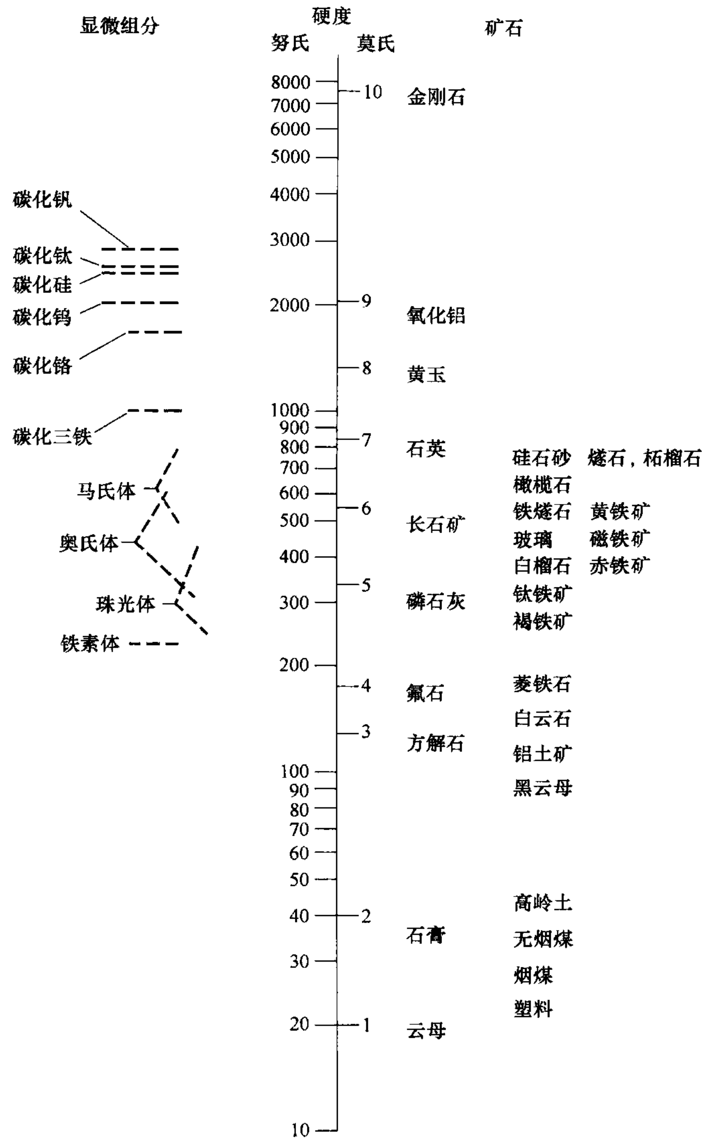


图 1.1-1 一些合金微量组分和不同矿石的硬度

表 1.1-12 锻压铝制品的近似当量硬度值

布氏硬度值（500kgf，10mm 球）HBS	维氏硬度值（15kgf）HV	洛氏硬度值			洛氏表面硬度值		
		B 标尺（100kgf，1/16in）HRB	E 标尺（100kgf，1/8in）HRE	H 标尺（100kgf，1/8in）HRH	15-T 标尺（15kgf，1/16in）HR15T	30-T 标尺（30kgf，1/16in）HR30T	15-W 标尺（15kgf，1/8in）HR15W
160	189	91	—	—	89	77	95
155	183	90	—	—	89	76	95
150	177	89	—	—	89	75	94
145	171	87	—	—	88	74	94

（续）

布氏硬度值（500kgf，10mm 球）HBS	维氏硬度值（15kgf）HV	洛氏硬度值 B 标尺（100kgf，$\frac{1}{16}$in）HRB	洛氏硬度值 E 标尺（100kgf，$\frac{1}{8}$in）HRE	洛氏硬度值 H 标尺（100kgf，$\frac{1}{8}$in）HRH	洛氏表面硬度值 15-T 标尺（15kgf，$\frac{1}{16}$in）HR15T	洛氏表面硬度值 30-T 标尺（30kgf，$\frac{1}{16}$in）HR30T	洛氏表面硬度值 15-W 标尺（15kgf，$\frac{1}{8}$in）HR15W
140	165	86	—	—	88	73	94
135	159	84	—	—	87	71	93
130	153	81	—	—	87	70	93
125	147	79	—	—	86	68	92
120	141	76	101	—	86	67	92
115	135	72	100	—	86	65	91
110	129	69	99	—	85	63	91
105	123	65	98	—	84	61	91
100	117	60	—	—	83	59	90
95	111	56	96	—	82	57	90
90	105	51	94	108	81	54	89
85	98	46	91	107	80	52	89
80	92	40	88	106	78	50	88
75	86	34	84	104	76	47	87
70	80	28	80	102	74	44	86
65	74	—	75	100	72	—	85
60	68	—	70	97	70	—	83
55	62	—	65	94	67	—	82
50	56	—	59	91	64	—	80
45	50	—	53	87	62	—	79
40	44	—	46	83	59	—	77

引自：ASTM E140。

表 1.1-13　锻压铜[w(Cu) >99%，合金 C10200 到 C14200]的近似当量硬度值

维氏硬度值		努氏硬度值		洛氏表面硬度值			洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			布氏硬度值	
1kgf	100gf	1kgf	500gf	15-T 标尺[15kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HR15T	15-T 标尺[15kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HR15T	30-T 标尺[30kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HR30T	B 标尺[100kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HRB	F 标尺[60kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HRF	15-T 标尺[15kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HR15T	30-T 标尺[30kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HR30T	45-T 标尺[45kgf，$\frac{1}{16}$in（1.558mm）球] HR45T	500kgf（10mm 直径球）HBS	20kgf（2mm 直径球）HBS
HV		HK		0.010in（0.25mm）带	0.020in（0.51mm）带		0.040in（1.02mm）带					0.080in（2.03mm）带	0.040in（1.02mm）带
130	127.0	138.7	133.8	—	85.0	—	67.0	99.0	—	69.5	49.0	—	119.0
128	125.2	136.8	132.1	83.0	84.5	—	66.0	98.0	87.0	68.5	48.0	—	117.5
126	123.6	134.9	130.4	—	84.0	—	65.0	97.0	—	67.5	46.5	120.0	115.0

（续）

维氏硬度值		努氏硬度值		洛氏表面硬度值			洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			布氏硬度值	
1kgf	100gf	1kgf	500gf	15-T标尺[15kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR15T	15-T标尺[15kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR15T	30-T标尺[30kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR30T	B标尺[100kgf, 1/16in (1.558mm)球] HRB	F标尺[60kgf, 1/16in (1.558mm)球] HRF	15-T标尺[15kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR15T	30-T标尺[30kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR30T	45-T标尺[45kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR45T	500kgf (10mm直径球) HBS	20kgf (2mm直径球) HBS
HV		HK		0.010in (0.25mm)带	0.020in (0.51mm)带		0.040in (1.02mm)带					0.080in (2.03mm)带	0.040in (1.02mm)带
124	121.9	133.0	128.7	82.5	83.5	—	64.0	96.0	86.0	66.5	45.0	117.5	113.0
122	121.1	131.0	127.0	—	83.0	—	62.5	95.5	85.5	66.0	44.0	115.0	111.0
120	118.5	129.0	125.2	82.0	82.5	—	61.0	95.0	—	65.0	42.5	112.0	109.0
118	116.8	127.1	123.5	81.5	—	—	59.5	94.0	85.0	64.0	41.0	110.0	107.5
116	115.0	125.1	121.7	—	82.0	—	58.5	93.0	—	63.0	40.0	107.0	105.5
114	113.5	123.2	119.9	81.0	81.5	—	57.0	92.5	84.5	62.0	38.5	105.0	103.5
112	111.8	121.4	118.1	80.5	81.0	—	55.0	91.5	—	61.0	37.0	102.0	102.0
110	109.9	119.5	116.3	80.0	—	—	53.5	91.0	84.0	60.0	36.0	99.5	100.0
108	108.3	117.5	114.5	—	80.5	—	52.0	90.5	83.5	59.0	34.5	97.0	98.0
106	106.6	115.6	112.6	79.5	80.0	—	50.0	89.5	—	58.0	33.0	94.5	96.0
104	104.9	113.5	110.1	79.0	79.5	—	48.0	88.5	83.0	57.0	32.0	92.0	94.0
102	103.2	111.5	108.0	78.5	79.0	—	46.5	87.5	82.5	56.0	30.0	89.5	92.0
100	101.5	109.4	106.0	78.0	78.0	—	44.5	87.0	82.0	55.0	28.5	87.0	90.0
98	99.8	107.3	104.0	77.5	17.5	—	42.0	85.5	81.0	53.5	26.5	84.5	88.0
96	98.0	105.3	102.1	77.0	17.0	—	40.0	84.5	80.5	52.0	25.5	82.0	86.5
94	96.4	103.2	100.0	76.5	76.5	—	38.0	83.0	80.0	51.0	23.0	79.5	85.0
92	94.7	101.0	98.0	76.0	75.5	—	35.5	82.0	79.0	49.0	21.0	77.0	83.0
90	93.0	98.9	96.0	75.5	75.0	—	33.0	81.0	78.0	47.5	19.0	74.5	81.0
88	91.2	96.9	94.0	75.0	74.5	—	30.5	79.5	77.0	46.0	16.5	—	79.0
86	89.7	95.5	92.0	74.5	73.5	—	28.0	78.0	76.0	44.0	14.0	—	77.0
84	87.9	92.3	90.0	74.0	73.0	—	25.5	76.5	75.0	43.0	12.0	—	75.0
82	86.1	90.1	87.9	73.5	72.0	—	23.0	74.5	74.5	41.0	9.5	—	73.0

（续）

维氏硬度值		努氏硬度值		洛氏表面硬度值			洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			布氏硬度值	
1kgf	100gf	1kgf	500gf	15-T标尺[15kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR15T	15-T标尺[15kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR15T	30-T标尺[30kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR30T	B标尺[100kgf, 1/16in (1.558mm)球] HRB	F标尺[60kgf, 1/16in (1.558mm)球] HRF	15-T标尺[15kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR15T	30-T标尺[30kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR30T	45-T标尺[45kgf, 1/16in (1.558mm)球] HR45T	500kgf (10mm直径球) HBS	20kgf (2mm直径球) HBS
HV		HK		0.010in (0.25mm)带	0.020in (0.51mm)带		0.040in (1.02mm)带					0.080in (2.03mm)带	0.040in (1.02mm)带
80	84.5	87.9	86.0	72.5	71.0	—	20.0	73.0	73.5	39.5	7.0	—	71.5
78	82.8	85.7	84.0	72.0	70.0	—	17.0	71.0	72.5	37.5	5.0	—	69.5
76	81.0	83.5	81.9	71.5	69.5	—	14.5	69.0	71.5	36.0	2.0	—	67.5
74	79.2	81.1	79.9	71.0	68.5	—	11.5	67.5	70.0	34.0	—	—	66.0
72	77.6	78.9	78.7	70.0	67.5	—	8.5	66.0	69.0	32.0	—	—	64.0
70	75.8	76.8	76.6	69.5	66.5	—	5.0	64.0	67.5	30.0	—	—	62.0
68	74.3	74.1	74.4	69.0	65.5	—	2.0	62.0	66.0	28.0	—	—	60.5
66	72.6	71.9	71.9	68.0	64.5	—	—	60.0	64.5	25.5	—	—	58.5
64	70.9	69.5	70.0	67.5	63.5	—	—	58.0	63.5	23.5	—	—	57.0
62	69.1	67.0	67.9	66.5	62.0	—	—	56.0	61.0	21.0	—	—	55.0
60	67.5	64.6	65.9	66.0	61.0	—	—	54.0	59.0	18.0	—	—	53.0
58	65.8	62.0	63.8	65.0	60.0	—	—	51.5	57.0	15.5	—	—	51.5
56	64.0	59.8	61.8	64.5	58.5	—	—	49.0	55.0	13.0	—	—	49.5
54	62.3	57.4	59.5	63.5	57.5	—	—	47.0	53.0	10.0	—	—	48.0
52	60.7	55.0	57.2	63.0	56.0	—	—	44.0	51.5	7.5	—	—	46.5
48	57.3	50.3	52.7	61.0	53.5	—	—	39.0	47.5	1.5	—	—	42.0
46	55.8	48.0	50.2	60.5	52.0	—	—	36.0	45.0	—	—	—	41.0
44	53.9	45.9	47.8	59.5	51.0	—	—	33.5	43.0	—	—	—	—
42	52.2	43.7	45.2	58.5	49.5	—	—	30.5	41.0	—	—	—	—
40	51.3	40.2	42.8	57.5	48.0	—	—	28.0	38.5	—	—	—	—

引自：ASTM E140。

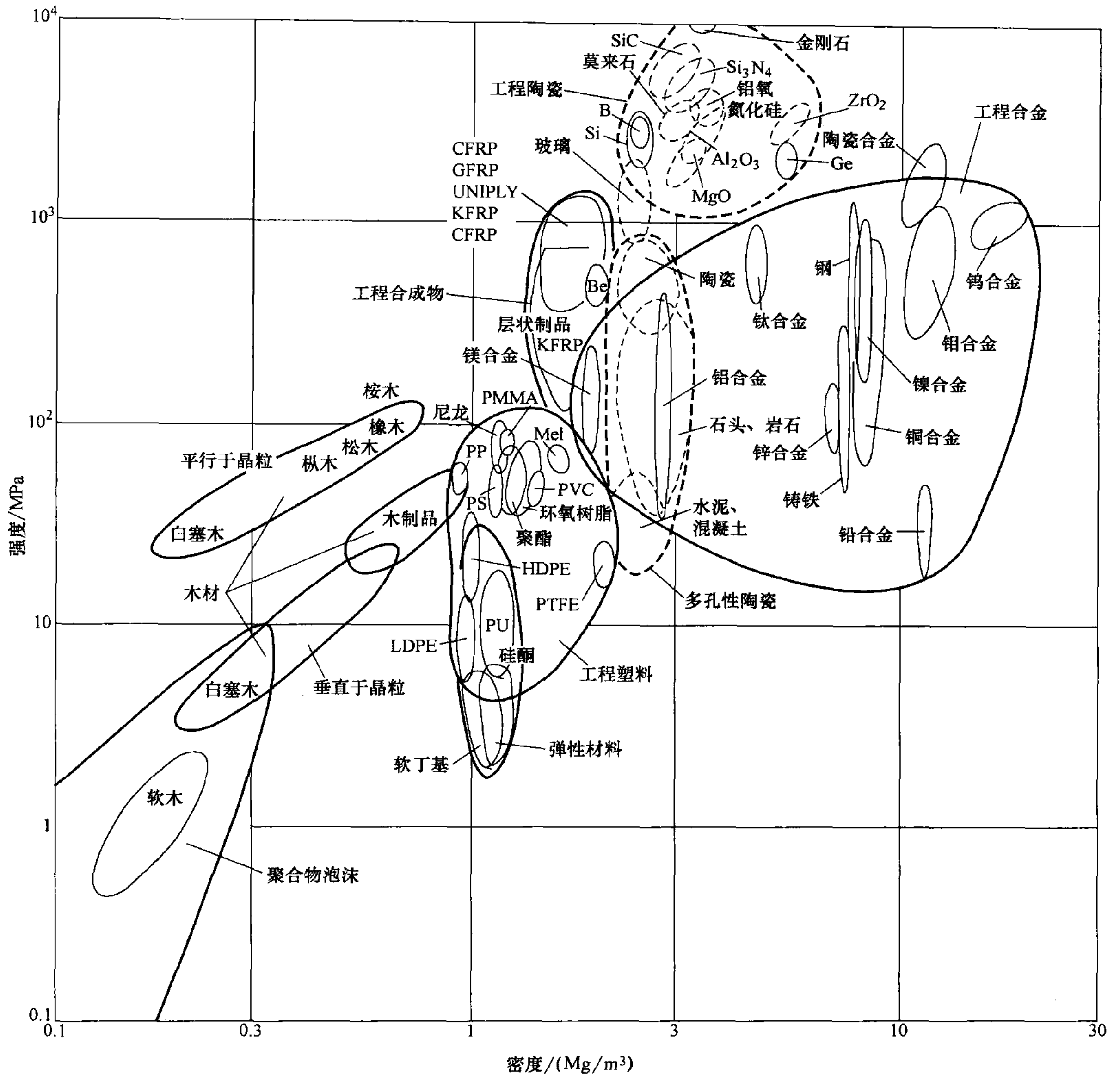


图1.1-2 不同工程材料的强度与密度之间的关系。对于金属/合金或聚合物强度就是屈服强度，对于陶瓷(注意包络虚线)为抗压强度，对于弹性材料为抗剪强度。应该指出工程陶瓷的抗拉强度比其抗压强度小15倍。图中缩略语：CFRP——碳纤维加强聚合物；GFRP——玻璃纤维加强聚合物；KFRP——芳纶1414纤维加强聚合物；PMMA——聚甲基丙烯酸甲酯；Mel——三聚氰胺；PP——聚丙烯；PS——聚苯乙烯；PVC——聚氯乙烯；HDPE——高密度聚乙烯；LDPE——低密度聚乙烯；PTFE——聚四氟乙烯；PU——聚氨基甲酸(乙)酯。

表1.1-14　弹壳黄铜[$w(Cu)$为70%，$w(Zn)$为30%]的近似当量硬度值

维氏硬度值 HV	洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			布氏硬度值（500kgf，10mm球）HBS
	B标尺[100kgf，1/16in（1.558mm）球] HRB	F标尺[60kgf，1/16in（1.558mm）球] HRF	15-T标尺[15kgf，1/16in（1.558mm）球] HR15T	30-T标尺[30kgf，1/16in（1.558mm）球] HR30T	45-T标尺[45kgf，1/16in（1.558mm）球] HR45T	
196	93.5	110.0	90.0	77.5	66.0	169
194	—	109.5	—	—	65.5	167
192	93.0	—	—	77.0	65.0	166
190	92.5	109.0	—	76.5	64.5	164
188	92.0	—	89.5	—	64.0	162
186	91.5	108.5	—	76.0	63.5	161
184	91.0	—	—	75.5	63.0	159
182	90.5	108.0	89.0	—	62.5	157
180	90.0	107.5	—	75.0	62.0	156
178	89.0	—	—	74.5	61.5	154
176	88.5	107.0	—	—	61.0	152
174	88.0	—	88.5	74.0	60.5	150
172	87.5	106.5	—	73.5	60.0	149
170	87.0	—	—	—	59.5	147
168	86.0	106.0	88.0	73.0	59.0	146
166	85.5	—	—	72.5	58.5	144
164	85.0	105.5	—	72.0	58.0	142
162	84.0	105.0	87.5	—	57.5	141
160	83.5	—	—	71.5	56.5	139
158	83.0	104.5	—	71.0	56.0	138
156	82.0	104.0	87.0	70.5	55.5	136
154	81.5	103.5	—	70.0	54.5	135
152	80.5	103.0	—	—	54.0	133
150	80.0	—	86.5	69.5	53.5	131
148	79.0	102.5	—	69.0	53.0	129
146	78.0	102.0	—	68.5	52.5	128
144	77.5	101.5	86.0	68.0	51.5	126
142	77.0	101.0	—	67.5	51.0	124
140	76.0	100.5	85.5	67.0	50.0	122
138	75.0	100.0	—	66.5	49.0	121
136	74.5	99.5	85.0	66.0	48.0	120
134	73.5	99.0	—	65.5	47.5	118

（续）

维氏硬度值 HV	洛氏硬度值		洛氏表面硬度值			布氏硬度值（500kgf，10mm 球）HBS
	B 标尺 [100kgf，1/16in (1.558mm)球] HRB	F 标尺 [60kgf，1/16in (1.558mm)球] HRF	15-T 标尺 [15kgf，1/16in (1.558mm)球] HR15T	30-T 标尺 [30kgf，1/16in (1.558mm)球] HR30T	45-T 标尺 [45kgf，1/16in (1.558mm)球] HR45T	
132	73.0	98.5	84.5	65.0	46.5	116
130	72.0	98.0	84.0	64.5	45.5	114
128	71.0	97.5	—	63.5	45.0	113
126	70.0	97.0	83.5	63.0	44.0	112
124	69.0	96.5	—	62.5	43.0	110
122	68.0	96.0	83.0	62.0	42.0	108
120	67.0	95.5	—	61.0	41.0	106
118	66.0	95.0	82.5	60.5	40.0	105
116	65.0	94.5	82.0	60.0	39.0	103
114	64.0	94.0	81.5	59.5	38.0	101
112	63.0	93.0	81.0	58.5	37.0	99
110	62.0	92.6	80.5	58.0	35.5	97
108	61.0	92.0	—	57.0	34.5	95
106	59.5	91.2	80.0	56.0	33.0	94
104	58.0	90.5	79.5	55.0	32.0	92
102	57.0	89.8	79.0	54.5	30.5	90
100	56.0	89.0	78.5	53.5	29.5	88
98	54.0	88.0	78.0	52.5	28.0	86
96	53.0	87.2	77.5	51.5	26.5	85
94	51.0	86.3	77.0	50.5	24.5	83
92	49.5	85.4	76.5	49.0	23.0	82
90	47.5	84.4	75.5	48.0	21.0	80
88	46.0	83.5	75.0	47.0	19.0	79
86	44.0	82.3	74.5	45.5	17.0	77
84	42.0	81.2	73.5	44.0	14.5	76
82	40.0	80.0	73.0	43.0	12.5	74
80	37.5	78.6	72.0	41.0	10.0	72
78	35.0	77.4	71.5	39.5	7.5	70
76	32.5	76.0	70.5	38.0	4.5	68
74	30.0	74.8	70.0	36.0	1.0	66
72	27.5	73.2	69.0	34.0	—	64
70	24.5	71.8	68.0	32.0	—	63

（续）

维氏硬度值 HV	洛氏硬度值 B标尺 [100kgf，1/16in（1.558mm）球] HRB	洛氏硬度值 F标尺 [60kgf，1/16in（1.558mm）球] HRF	洛氏表面硬度值 15-T标尺 [15kgf，1/16in（1.558mm）球] HR15T	洛氏表面硬度值 30-T标尺 [30kgf，1/16in（1.558mm）球] HR30T	洛氏表面硬度值 45-T标尺 [45kgf，1/16in（1.558mm）球] HR45T	布氏硬度值（500kgf，10mm球）HBS
68	21.5	70.0	67.0	30.0	—	62
66	18.5	68.5	66.0	28.0	—	61
64	15.5	66.8	65.0	25.5	—	59
62	12.5	65.0	63.5	23.0	—	57
60	10.0	62.5	62.5	—	—	55
58	—	61.0	61.0	18.0	—	53
56	—	58.8	60.0	15.0	—	52
54	—	56.5	58.5	12.0	—	50
52	—	53.5	57.0	—	—	48
50	—	50.5	55.5	—	—	47
49	—	49.0	54.5	—	—	46
48	—	47.0	53.5	—	—	45
47	—	45.0	—	—	—	44
46	—	43.0	—	—	—	43
45	—	40.0	—	—	—	42

引自：ASTM E140。

表1.1-15　金属和合金的统一编号系统（UNS）导则

UNS系列	金属/合金	UNS系列	金属/合金
非铁金属和合金		**非铁金属和合金**	
A00001～A99999	铝和铝合金	E68000～E68999	镥
C00001～C99999	铜和铜合金	E69000～E73999	钕
E00001～E99999	稀土和稀土样金属和合金	E74000～E77999	镨
E00001～E00999	锕	E78000～E78999	钷
E01000～E20999	铈	E79000～E82999	钐
E21000～E45999	混合稀土（如含铈稀土元素合金）	E83000～E84999	钪
		E85000～E86999	铽
E46000～E47999	镝	E87000～E87999	铥
E48000～E49999	铒	E88000～E89999	镱
E50000～E51999	铕	E90000～E99999	钇
E52000～E55999	钆	L00001～L99999	低熔点金属和合金
E56000～E57999	钬	L00001～L00999	铋
E58000～E67999	镧	L01001～L01999	镉

（续）

UNS 系列	金属/合金
非铁金属和合金	
L02001 ~ L02999	铯
L03001 ~ L03999	镓
L04001 ~ L04999	铟
L06001 ~ L06999	锂
L07001 ~ L07999	汞
L08001 ~ L08999	钾
L09001 ~ L09999	铷
L10001 ~ L10999	硒
L11001 ~ L11999	钠
L13001 ~ L13999	锡
L50001 ~ L59999	铅
M00001 ~ M99999	其他非铁金属和合金
M00001 ~ M00999	锑
M01001 ~ M01999	砷
M02001 ~ M02999	钡
M03001 ~ M03999	钙
M04001 ~ M04999	锗
M05001 ~ M05999	钚
M06001 ~ M06999	锶
M07001 ~ M07999	碲
M08001 ~ M08999	铀
M10001 ~ M19999	镁
M20001 ~ M29999	锰
M30001 ~ M39999	硅
P00001 ~ P99999	贵重金属和合金
P00001 ~ P00999	金
P01001 ~ P01999	铱
P02001 ~ P02999	锇
P07001 ~ P07999	银
R00001 ~ R99999	活性和难熔金属和合金
R01001 ~ R01999	硼
R02001 ~ R02999	铪
R03001 ~ R03999	钼
R04001 ~ R04999	铌
R05001 ~ R05999	钽
非铁金属和合金	
R06001 ~ R06999	钍
R07001 ~ R07999	钨
R08001 ~ R08999	钒
R10001 ~ R19999	铍
R20001 ~ R29999	铬
R30001 ~ R39999	钴
R40001 ~ R49999	铼
R50001 ~ R59999	钛
R60001 ~ R69999	锆
Z00001 ~ Z99999	锌合锌合金
铁金属和合金	
D00001 ~ D99999	钢的规定机械性质
F00001 ~ F99999	铸铁(灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁)
G00001 ~ G99999	AISI 和 SAE 碳钢和合金钢(工具钢除外)
H00001 ~ H99999	AISI 和 SAE H-钢(碳,碳硼和合金 H 钢)
J00001 ~ J99999	铸钢(工具钢除外)
K00001 ~ K99999	其他钢和铁合金
S00001 ~ S99999	耐热和耐腐蚀钢(不锈钢)
T00001 ~ T99999	工具钢
焊接用钎料金属	
W00001 ~ W99999	焊接钎料金属、涂敷和管状焊条、按焊敷成分分类
W00001 ~ W09999	含不重要合金元素的碳钢
W10000 ~ W19999	锰钼低合金钢
W20000 ~ W29999	镍低合金钢
W30000 ~ W39999	奥氏体不锈钢
W40000 ~ W49999	铁素体不锈钢
W50000 ~ W59999	铬低合金钢
W60000 ~ W69999	铜基合金
W70000 ~ W79999	堆焊合金
W80000 ~ W89999	镍基合金

注：有关 UNS 的进一步详细内容结合参阅 ASTM E527/SAE J1066 标准，“金属和合金编号的推荐方法”。

表 1.1-16 国际标准 SI 前缀——名称和符号

因次	相乘因子	字头(中文名称)	符号
10^{24}	1, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000	yotta	Y
10^{21}	1, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000	zetta	Z
10^{18}	1, 000, 000, 000, 000, 000, 000	Exa(艾可萨)	E
10^{15}	1, 000, 000, 000, 000, 000	Peta(拍它)	P
10^{12}	1, 000, 000, 000, 000	Tera(太拉)	T
10^{9}	1, 000, 000, 000	Glga②(吉咖)	G
10^{6}	1, 000, 000	Meta(兆)	M
10^{3}	1, 000	Kilo(千)	k
10^{2}	100	hecto①(百)	h
10^{1}	10	deka①(十)	da
10^{0}	1	BASE UNIT(基本单位)	
10^{-1}	0. 1	deci(a)(分)	d
10^{-2}	0. 01	centi(a)(厘)	c
10^{-3}	0. 001	Milli(毫)	m
10^{-6}	0. 000, 001	Micro(微)	μ
10^{-9}	0. 000, 000, 001	Nano(纳诺)	n
10^{-12}	0. 000, 000, 000, 001	Pica(皮可)	p
10^{-15}	0. 000, 000, 000, 000, 001	Femto(飞母托)	f
10^{-18}	0. 000, 000, 000, 000, 000, 001	Atto(阿托)	a
10^{-21}	0. 000, 000, 000, 000, 000, 000, 001	zepto	z
10^{-24}	0. 000, 000, 000, 000, 000, 000, 000, 001	yocto	y

①不推荐用。字头应当按照 10^3 的步进选用，故在字头前的数字位于0.1和1000之间。这些字头不应用于长度测量的单位，但可以用于较高的数量级单位。例如长度测量中，decimeter(分米)并不推荐使用，但平方分米是能用的。 ②原文有误，应为giga。——译者注。

表 1.1-17 国际单位制(SI)的基本单位、辅助单位和导出单位

计量	单位名称	单位符号	计算公式	计量	单位名称	单位符号	计算公式
基本单位				**辅助单位**			
物质的量	摩[尔](克分子)(mole)	mol		平面角	弧度(radian)	rad	
电流	安[培](ampere)	A		立体角	球面度(steradian)	sr	
长度	米(meter)	m		**导出单位**			
发光强度	坎[德拉](烛光)(candela)	cd		吸收剂量	戈[瑞](gray)	Gy	J/kg
				加速度	米/每二次方秒	m/s^2	
质量	千克(kilogram)	kg		放射性活度	贝可[勒尔](becquerel)	Bq	1/s
热力学温度	开[尔文](kelvin)	K		角加速度	弧度每二次方秒	rad/s^2	
时间	秒(second)	s		角速度	弧度每秒	rad/s	

（续）

计　量	单位名称	单位符号	计算公式
导出单位			
面积	平方米	m^2	
浓度	摩[尔]每立方米	mol/m^3	
电流密度	安[培]每平方米	A/m^2	
质量密度	千克每立方米	kg/m^3	
剂量当量	希[沃特](sievert)	Sv	J/kg
电容	法[拉](farad)	F	C/V
电荷密度	库[仑]每立方米	C/m^3	
电导	西[门子](siemens)	S	A/V
电场强度	伏[特]每米	V/m	
电通量密度	库[仑]每平方米	C/m^2	
电压、电压差、电动势	伏[特](volt)	V	W/A
电阻	欧姆(ohm)	Ω	V/A
能量、功、热量	焦[耳](Joule)	J	N · m
能量密度	焦[耳]每立方米	J/m^3	
熵	焦[耳]每开[尔文]	J/K	
力	牛[顿](niudun)	N	$kg \cdot m/s^2$
频率	赫[兹](hertz)	Hz	1/s
热容量	焦[耳]每开[尔文]	J/K	
热通密度	瓦[特]每平方米	W/m^2	
光照度	勒[克斯](lux)	lx	lm/m^2
电感	亨[利](henry)	H	Wb/A
辐照度	瓦[特]每平方米	W/m^2	
亮度	坎[德拉]每平方米	cd/m^2	
光通量	流[明](lumen)	lm	cd · sr
磁场强度	安[培]每米	A/m	

计　量	单位名称	单位符号	计算公式
导出单位			
磁通量	韦[伯](weber)	Wb	V · s
磁通量密度	特[斯拉](tesla)	T	Wb/m^2
克分子能量	焦[耳]每摩[尔]	J/mol	
克分子熵	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	J/mol · K	
克分子热容量	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	J/mol · K	
力矩	牛[顿]米	N · m	
磁导率	亨[利]每米	H/m	
电容率	法[拉]每米	F/m	
功率、辐射通量	瓦[特](watt)	W	J/s
压力、应力	帕[斯卡](pascal)	Pa	N/m^2
电量、电荷	库[仑](coulomb)	C	A · s
面辐射强度	瓦[特]每平方米球面度	$W/m^2 \cdot sr$	
辐射强度	瓦[特]每球面度	W/sr	
比热容量	焦[耳]每千克开[尔文]	J/kg · K	
比能	焦[耳]每千克	J/kg	
比熵	焦[耳]每千克开[尔文]	J/kg · K	
比体积	立方米每千克	m^3/kg	
表面张力	牛[顿]每米	N/m	
热导率	瓦[特]每米开[尔文]	W/m · K	
速度	米每秒	m/s	
动力粘度	帕[斯卡]秒	Pa · s	
运动粘度	平方米每秒	m^2/s	
体积	立方米	m^3	
波数	每米	1/m	

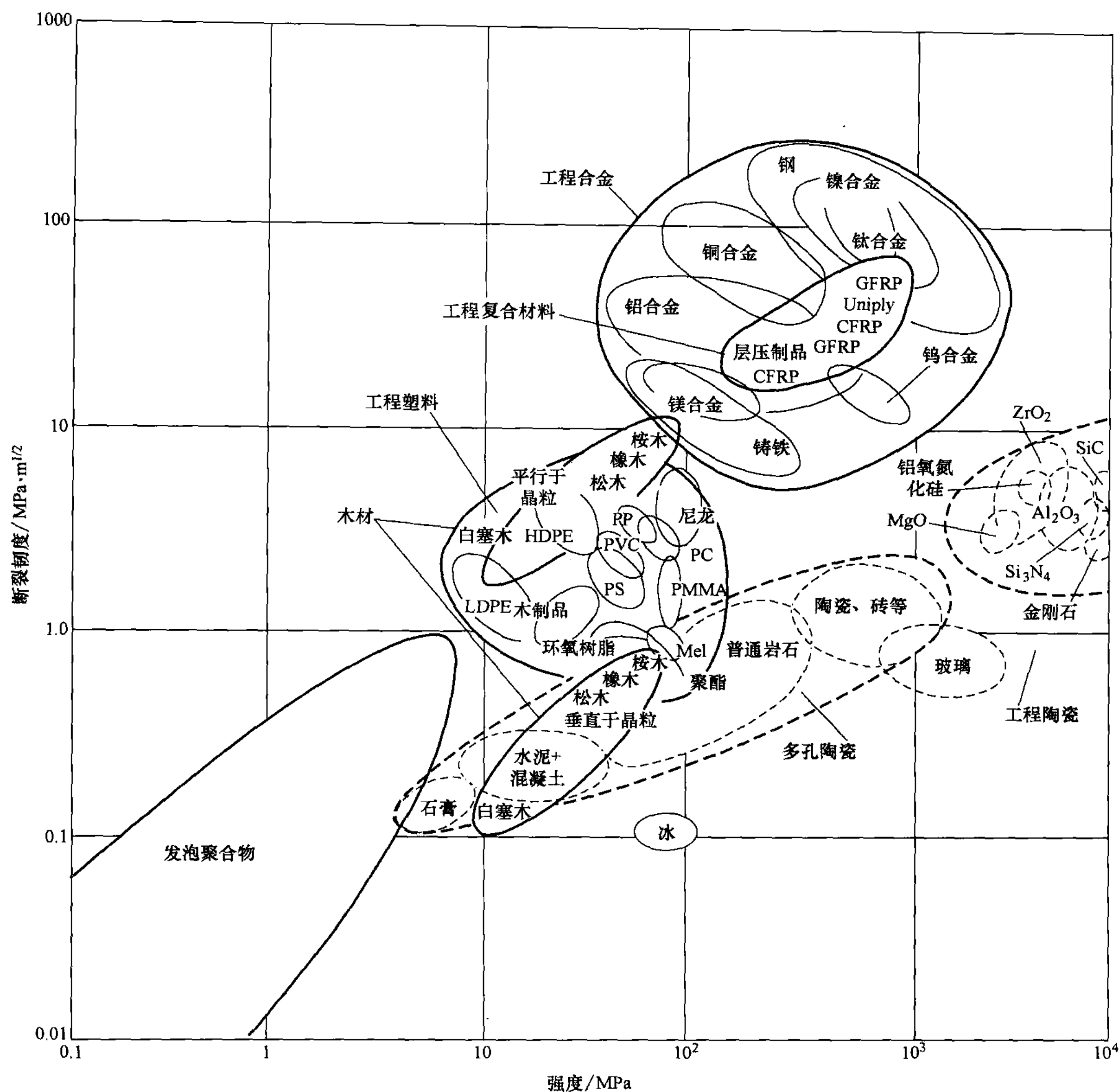


图 1.1-3　不同工程材料的断裂韧度与强度之间的关系。对于金属/合金或聚合物强度就是屈服强度，对于陶瓷（注意包络虚线）为抗压强度，而对于弹性材料为抗剪强度。应该指出工程陶瓷的抗拉强度比其抗压强度小 15 倍。图中缩略语：CFRP——碳纤维加强聚合物；GFRP——玻璃纤维加强聚合物；PMMA——聚甲基丙烯酸甲酯；Mel——三聚氰胺；PP——聚丙烯；PC——聚碳酸酯；PS——聚苯乙烯；PVC——聚氯乙烯；HDPE——高密度聚乙烯；LDPE——低密度聚乙烯。

表 1.1-18　计量单位的换算（按量值/类别排序）

换算单位	换算成单位	乘以换算因子	换算单位	换算成单位	乘以换算因子
角度			**面积**		
°	rad	1.745329E-02	in^2	mm^2	6.451600E-02

（续）

换 算 单 位	换算成单位	乘以换算因子
面积		
in^2	cm^2	6.451600E+00
in^2	m^2	6.451600E-04
ft^2	m^2	9.290304E-02
弯矩或转矩		
lbf·in	N·m	1.129848E-01
lbf·ft	N·m	1.355818E+00
kgf·m	N·m	9.806650E+00
ozf·in	N·m	7.061552E-03
单位长度的弯矩或转矩		
lbf·in/in	N·m/m	4.448222E+00
lbf·ft/in	N·m/m	5.337866E+01
电流密度		
A/in^2	A/cm^2	1.550003E-01
A/in^2	A/mm^2	1.550003E-03
A/ft^2	A/m^2	1.076400E+01
电学和磁学		
Gauss(高斯,Gs)	T	1.000000E-04
Maxwell(麦克斯韦,Mx)(磁通[量])	μWb	1.000000E-02
Mho(姆欧,℧)(电导)	S	1.000000E+00
Oersted(奥斯特,Oe)(磁场强度)	A/m	7.957700E+01
Ω·cm	Ω·m	1.000000E-02
Ω圆密耳[⊖]/ft	μΩ·m	1.662426E-03
能量(冲击及其他)		
ft·lbf	J	1.355818E+00
Btu(英制热力学)	J	1.054350E+03
cal_{th}(热化学卡)	J	4.184000E+00
kW·h	J	3.600000E+06
W·h	J	3.600000E+03
流速		
ft^3/h	L/min	4.719475E-01
ft^3/min	L/min	2.831000E+01
gal/h	L/min	6.309020E-02
gal/min	L/min	3.785412E+00
力		
lbf	N	4.448222E+00
kip(1000lbf)	N	4.448222E+03
tonf	kN	8.896443E+00
kgf	N	9.806650E+00
单位长度力		
lbf/ft	N/m	1.459390E+01
lbf/in	N/m	1.751268E+02
断裂韧度		
ksi $\sqrt{in}$	MPa $\sqrt{m}$	1.098800E+00
热容量		
Btu/lb	kJ/kg	2.326000E+00
cal/g	kJ/kg	4.186800E+00
热输入		
J/in	J/m	3.937008E+01
kJ/in	kJ/m	3.937008E+01
长度		
Å	nm	1.000000E-01
μin	μm	2.540000E-02
mil(密耳)	μm	2.540000E+01
in(英寸)	mm	2.540000E+01
in	cm	2.540000E+00
ft(英尺)	m	3.048000E-01
yd(码)	m	9.144000E-01
mile(英里)	km	1.609300E+00
质量		
oz(盎司)	kg	2.834952E-02
lb(英磅)	kg	4.535924E-01
ton(短,2000lb)	kg	9.071847E+02
ton(短,2000lb)	$kg\times10^3$①	9.071847E-01
ton(长,2240lb)	kg	1.016047E+03

⊖ 圆密耳，一种用于计量导线截面的面积单位，它等于直径 1mil，即 0.001in 的圆的面积 $=7.854\times10^{-7}in^2$。——译者注。

（续）

换算单位	换算成单位	乘以换算因子
单位面积质量		
oz/in^2	kg/m^2	4.395000E+01
oz/ft^2	kg/m^2	3.051517E−01
oz/yd^2	kg/m^2	3.390575E−02
lb/ft^2	kg/m^2	4.882428E+00
单位长度质量		
lb/ft	kg/m	1.488164E+00
lb/in	kg/m	1.785797E+01
单位时间质量		
lb/h	kg/s	1.259979E−04
lb/min	kg/s	7.559873E−03
lb/s	kg/s	4.535924E−01
单位体积质量（包括密度）		
g/cm^3	kg/m^3	1.000000E+03
lb/ft^3	g/cm^3	1.601846E−02
lb/ft^3	kg/m^3	1.601846E+01
lb/in^3	g/cm^3	2.767990E+01
lb/in^3	kg/m^3	2.767990E+04
功率		
Btu/s	kW	1.055056E+00
Btu/min	kW	1.758426E−02
Btu/h	W	2.928751E−01
erg/s	W	1.000000E−07
ft·lbf/s	W	1.355818E+00
ft·lbf/min	W	2.259697E−02
ft·lbf/h	W	3.766161E−04
hp(550ft·lbf/s)（马力）	kW	7.456999E−01
hp（电工马力）	kW	7.460000E−01
功率密度		
W/in^2	W/m^2	1.550003E+03
压力（流体）		
atm（标准大气压）	Pa	1.013250E+05
bar	Pa	1.000000E+05
inHg(32℉)	Pa	3.386380E+03
inHg(60℉)	Pa	3.376850E+03
lbf/in^2(psi)	Pa	6.894757E+03
压力（流体）		
Torr(mmHg,0℃)	Pa	1.333220E+02
比热		
Btu/(lb·℉)	J/(kg·K)	4.186800E+03
cal/(g·℃)	J/(kg·K)	4.186800E+03
应力（单位面积力）		
tonf/in^2(tsi)	MPa	1.378951E+01
kgf/mm^2	MPa	9.806650E+00
ksi	MPa	6.894757E+00
lbf/in^2(psi)	MPa	6.894757E−03
MN/m^2	MPa	1.000000E+00
温度		
℉	℃	5/9·(℉−32)
°R(Rankine 兰氏度)	°K	5/9
温度区间		
℉	℃	5/9
热导率		
Btu·in/(s·ft^2·℉)	W/(m·K)	5.192204E+02
Btu/(ft·h·℉)	W/(m·K)	1.730735E+00
Btu·in/(h·ft^2·℉)	W/(m·K)	1.442279E−01
cal/(cm·s·℃)	W/(m·K)	4.184000E+02
热膨胀		
in/(in·℃)	m/(m·K)	1.000000E+00
in/(in·℉)	m/(m·K)	1.800000E+00
速度		
ft/h	m/s	8.466667E−05
ft/min	m/s	5.080000E−03
ft/s	m/s	3.048000E−01
in/s	m/s	2.540000E−02
km/h	m/s	2.777778E−01
mph(m/h)	km/h	1.609344E+00
转速		
rev/min(rpm,r/min)	rad/s	1.047164E−01
rev/s(r/s)	rad/s	6.283185E+00
粘度		
泊(poise)(P,Po)	Pa·s	1.000000E+01

（续）

换 算 单 位	换算成单位	乘以换算因子	换 算 单 位	换算成单位	乘以换算因子
粘度			**体积**		
斯[托克斯](stoke)(St)	m^2/s	1.000000E－04	gal(加仑)(U.S. 液体)	m^3	3.785412E－03
ft^2/s	m^2/s	9.290304E－02	**单位时间体积**		
in^2/s	mm^2/s	6.451600E＋02	ft^3/min	m^3/s	4.719474E－04
体积			ft^3/s	m^3/s	2.831685E－02
in^3	m^3	1.638706E－05	in^3/min	m^3/s	2.731177E－07
ft^3	m^3	2.831685E－02	**波长**		
fluidoz(液量盎司)	m^3	2.957353E－05	Å	nm	1.000000E－01

注：换算因子表示成为大于1而小于10并小数点后六位的数字，后面跟随字母E及带正或负号的两位数，以此数表示10的方次幂，然后再将其乘以E前面的数字得到真正的换算因子值。例如3.523907E－02就是3.523907×10^{-2}或0.03523907。

①$kg\times10^3$＝1 metric tonne(公吨)。

表1.1-19 计量单位的换算(按字母排序)

换 算 单 位	换算成单位	换 算 因 子
绝对安培	A	1.000000＊E＋01
绝对库仑	C	1.000000＊E＋01
绝对法拉	F	1.000000＊E＋09
绝对亨利	H	1.000000＊E－09
绝对姆欧	S	1.000000＊E＋09
绝对欧姆	Ω	1.000000＊E－09
绝对伏特	V	1.000000＊E－08
安培小时	C	3.600000＊E＋03
Å	m	1.000000＊E－10
标准大气压	Pa	1.013250＊E＋0.5
工程大气压 atmosphere, technical(1at＝1kgf/cm^2)	Pa	9.806650＊E＋04
巴(bar)	Pa	1.00000＊E＋05
巴恩(barn)	m^2	1.00000＊E－28
美桶(用于石油,42gal)	m^3	1.589873E－01
英制热力单位(国际表)	J	1.055056E＋03
英制热力单位(平均)	J	1.05587E＋03
英制热力单位(热化学)	J	1.054350E＋03
英制热力单位(39℉)	J	1.05967E＋03
英制热力单位(59℉)	J	1.05480E＋03
英制热力单位(60℉)	J	1.05468E＋03
Btu(国际表)·ft/(h·ft^2·℉)热导率	W/(m·K)	1.730735E＋00
Btu(热化学)·ft/(h·ft^2·℉)热导率	W/(m·K)	1.729577E＋00
Btu(国际表)·in/(h·ft^2·℉)热导率	W/(m·K)	1.442279E－01
Btu(热化学)·in/(h·ft^2·℉)热导率	W/(m·K)	1.441314E－01
Btu(国际表)·in/(s·ft^2·℉)热导率	W/(m·K)	5.192204E＋02
Btu(热化学)·in/(s·ft^2·℉)热导率	W/(m·K)	5.188732E＋02
Btu(国际表)/h	W	2.930711E－01
Btu(国际表)/s	W	1.055056E＋03
Btu(热化学)/h	W	2.928751E－01
Btu(热化学)/min	W	1.757250E＋01
Btu(热化学)/s	W	1.054350E＋03
Btu(国际表)/ft^2	J/m^2	1.135653E＋04
Btu(热化学)/ft^2	J/m^2	1.134893E＋04
Btu(国际表)/(ft^2·s)	W/m^2	1.135653E＋04
Btu(国际表)/(ft^2·h)	W/m^2	3.154591E＋00
Btu(热化学)/(ft^2·h)	W/m^2	3.152481E＋00
Btu(热化学)/(ft^2·min)	W/m^2	1.891489E＋02
Btu(热化学)/(ft^2·s)	W/m^2	1.134893E＋04

（续）

换算单位	换算成单位	换算因子	换算单位	换算成单位	换算因子
Btu(热化学)/(in^2·s)	W/m^2	1.634246E+06	cd/in^2	cd/m^2	1.550003E+03
Btu(国际表)/(h·ft^2·℉)（热容、比热）	W/(m^2·K)	5.678263E+00	克拉(carat)（米制）	kg	2.000000*E-04
Btu(热化学)/(h·ft^2·℉)（热容、比热）	W/(m^2·K)	5.674466E+00	水银柱高厘米(cmHg)(0℃)	Pa	1.33322E+03
Btu(国际表)/(s·ft^2·℉)	W/(m^2·K)	2.044175E+04	水柱高厘米(cmH_2O)(4℃)	Pa	9.80638E+01
Btu(热化学)/(s·ft^2·℉)	W/(m^2·K)	2.042808E+04			
Btu(国际表)/lb	J/kg	2.326000*E+03	cP(动力粘度)	Pa·s	1.000000*E-03
Btu(热化学)/lb	J/kg	2.324444E+03	cSt(运动粘度)	m^2/s	1.000000*E-06
Btu(国际表)/(lb·℉)	J/(kg·K)	4.186800*E+03	密耳圆	m^2	5.067075E-10
Btu(热化学)/(lb·℉)	J/(kg·K)	4.184000*E+03	居里	Bq	3.700000*E+10
Btu(国际表)/ft^3	J/m^3	3.725895E+04	°(角度)	rad	1.745329E-02
Btu(热化学)/ft^3	J/m^3	3.723402E+04	℃	K	$T_k = t_{℉} + 273.15$
蒲式耳 bushel(U.S.)	m^3	3.523907E-02	℉	℃	$t_{℃} = (t_{℉} - 32)/1.8$
卡路里(calorie)(国际表)	J	4.186800*E+00	℉	K	$T_K = (t_{℉} + 459.67)/1.8$
卡路里(calorie)(平均)	J	4.19002E+00			
卡路里(calorie)(热化学)	J	4.184000*E+00	°R(Rankine 兰氏度)	K	$T_K = T_{°R}/1.8$
卡路里(calorie)(15℃)	J	4.18580E+00	℉·h·ft^2/Btu（国际表）(热阻)	K·m^2/W	1.761102E-01
卡路里(calorie)(20℃)	J	4.18190E+00			
卡路里(calorie)（kg,国际表）	J		℉·h·ft^2/Btu（热化学）(热阻)	K·m^2/W	1.762280E-01
卡路里(calorie)(kg,平均)	J	4.19002E+03	℉·h·ft^2/[Btu（国际表）·in](热阻)	K·m/W	6.933471E+00
卡路里(calorie)（kg,热化学）	J	4.184000*E+03	℉·h·ft^2/[Btu（热化学）·in](热阻)	K·m/W	6.938113E+00
cal(热化学)/cm^2(cal_{th}/cm^2)	J/m^2	4.184000*E+04	但尼尔(denier)(支、濮，测量丝的纤维度单位)	kg/m	1.111111E-07
cal(国际表)/g	J/kg	4.186800*E+03			
cal(热化学)/g	J/kg	4.184000*E+03	达因(dyn)	N	1.000000*E-05
cal(国际表)/(g·℃)	J/(kg·K)	4.186800*E+03	dyn·cm	N·m	1.000000*E-07
cal(热化学)/(g·℃)	J/(kg·K)	4.184000*E+03	dyn/cm^2	Pa	1.000000*E-01
cal(热化学)/min	W	6.973333E-02	电子伏特(eV)	J	1.60219E-19
cal(热化学)/s	W	4.184000*E+00	电容的电磁单位(EMU)	F	1.000000*E+09
cal(热化学)/(cm^2·s)	W/m^2	4.184000*E+04	电流的电磁单位(EMU)	A	1.000000*E+01
cal(热化学)/(cm^2·min)	W/m^2	6.973333E+02	电压的电磁单位(EMU)	V	1.000000*E-08
cal(热化学)/(cm^2·s)	W/m^2	4.184000*E+04	电感的电磁单位(EMU)	H	1.000000*E-09
cal(热化学)/(cm·s·℃)	W/(m·K)	4.184000*E+02	电阻的电磁单位(EMU)	Ω	1.000000*E-09
			电容的静电单位(ESU)	F	1.112650E-12

（续）

换算单位	换算成单位	换算因子
电流的静电单位(ESU)	A	3.3356E-10
电压的静电单位(ESU)	V	2.9979E+02
电感的静电单位(ESU)	H	8.987554E+11
电阻的静电单位(ESU)	Ω	8.987554E+11
尔格(erg)	J	1.000000 * E-07
erg/(cm^{2}·s)	W/m^{2}	1.000000 * E-03
erg/s	W	1.000000 * E-07
法拉第(基于碳-12)	C	9.64870E+04
法拉第(化学)	C	9.64957E+04
法拉第(物理)	C	9.65219E+04
液量盎司(fluid Ounce)(U.S.)	m^{3}	2.957353E-05
ft	m	3.048000 * E-01
ft^{2}	m^{2}	9.290304 * E-02
ft^{2}/h(热扩散率、导热性)	m^{2}/s	2.580640 * E-05
ft^{2}/s	m^{2}/s	9.290304 * E-02
ft^{3}/min	m^{3}/s	4.719474E-04
ft^{3}/s	m^{3}/s	2.831685E-02
ft/h	m/s	8.466667E-05
ft/min	m/s	5.080000 * E-03
ft/s	m/s	3.048000 * E-01
ft/s^{2}	m/s^{2}	3.048000 * E-1
英尺·烛光(footcandle)	lx	1.076391E+01
英尺·郎伯(footlambert)	cd/m^{2}	3.426259E+00
ft·lbf	J	1.355818E+00
ft·lbf/h	W	3.766161E-04
ft·lbf/min	W	2.259697E-02
ft·lbf/s	W	1.355818E+00
英尺·磅达(ft-poundal)	J	4.214011E-02
g，标准自由落体	m/s^{2}	9.806650 * E+00
伽[俐略](Gal)	m/s^{2}	1.00000 * E-02
加仑(加拿大液体)	m^{3}	4.546090E-03
加仑(英制液体)	m^{3}	4.546092E-03
加仑(美制干料)	m^{3}	4.404884E-03
加仑(美制液体)	m^{3}	3.785412E-03
加仑(美制液体)按天	m^{3}/s	4.381264E-08

换算单位	换算成单位	换算因子
加仑(美制液体)按分钟	m^{3}/s	6.309020E-05
加仑(美制液体)按 hp·h (SFC,燃料消耗率)	m^{3}/J	1.410089E-09
高斯(gauss,Gs)	特[斯拉](T)(MKS 制)	1.000000 * E-04
吉伯(gilbert)(磁通势单位)	A(安匝)	7.957747E-01
格令(grain)(英制质量单位)	kg	6.479891 * E-05
格令/加仑(gr/gal,美制液体)	kg/m^{3}	1.711806E-02
克(gram)	kg	1.000000 * E-03
g/cm^{3}	kg/m^{3}	1.000000 * E+03
gf/cm^{2}	Pa	9.806650 * E+01
公顷(hectare,hm^{2})	m^{2}	1.000000 * E+04
马力(horsepower,hp)(550ft·lbf/s)	W	7.456999E+02
hp[汽力(boiler)]	W	9.80950E+03
hp[电力(electric)]	W	7.460000 * E+02
hp[米制(metric)]	W	7.35499E+02
hp[水力(water)]	W	7.46043E+02
hp(英制 U.K)	W	7.4570E+02
in	m	2.540000 * E-02
inHg(32℉)	Pa	3.38638E+03
inHg(60℉)	Pa	3.37685E+03
inHg(39.2℉)	Pa	2.49082E+02
inHg(60℉)	Pa	2.4884E+02
in^{2}	m^{2}	6.451600 * E-04
in^{3}(体积)	m^{3}	1.638706E-05
in^{3}/min	m^{3}/s	2.731177E-07
in/s	m/s	2.540000 * E-02
in/s^{2}	m/s^{2}	2.540000 * E-02
热力学温度(kelvin,K)	℃	$t_{℃} = T_K - 273.15$
千卡(kcal)(国际表)	J	4.186800 * E+03
千卡(Kilocalorie)(平均)	J	4.19002E+03
千卡(kcal$_{th}$)(热化学)	J	4.184000 * E+03
千卡(kcal$_{th}$)(热化学)/min	W	6.973333E+01

（续）

换算单位	换算成单位	换算因子
千卡($kcal_{th}$)(热化学)/s	W	4.184000 * E +03
千克力(kilogram-force,kgf)	N	9.806650 * +00
kgf·m	N·m	9.806650 * E +00
kgf·s^2/m(质量)	kg	9.806650 * E +00
kgf/cm^2	Pa	9.806650 * E +04
kgf/m^2	Pa	9.806650 * E +00
kgf/mm^2	Pa	9.806650 * E +06
km/h	m/s	2.777778E -01
千克力(kilopond,1kp = 1kgf)	N	9.806650 * E +00
节[knot,海里(n mile)//小时]	m/s	5.144444E -01
kW·h	J	3.600000 * E +06
千磅[kip(1000lbf)]	N	4.448222E +03
kip/in^2(ksi)	Pa	6.894757E +06
郎伯(lambert)	cd/m^2	1/π * E +04
郎伯(lambert)	cd/m^2	3.183099E +03
升(liter,L)	m^3	1.000000 * E -03
lm/ft^2	lm/m^2	1.076391E +01
麦克斯韦(maxwell,Mx)	Wb	1.000000 * E -08
姆欧(mho,℧)	S	1.000000 * E +00
μin	m	2.540000 * E -08
μm(常用 micrometer)	m	1.000000 * E -06
mil	m	2.540000 * E -05
mile(英里)(国际)	m	1.609344 * E +03
mile(美制规定)	m	1.609347E +03
mile(国际海里)	m	1.852000 * E +03
mile(美制海里)	m	1.852000 * E +03
mi^2(国际)	m^2	2.589988E +06
mi^2(美制规定)	m^2	2.589998E +06
mi/h(国际)	m/s	4.470400 * E -01
mi/h(国际)	km/h	1.609344 * E +00
mi/min(国际)	m/s	2.682240 * E +01
mi/s(国际)	m/s	1.609344 * E +03
millibar(国际)	Pa	1.000000 * E +02
mm Hg(0℃)	Pa	1.33322E +02

换算单位	换算成单位	换算因子
'(角度)	rad	2.908882E -04
奥斯特(oersted,Oe)	A/m	7.957747E +01
Ω·cm	Ω·m	1.000000 * E -02
Ω·圆密耳/ft	Ω·m	1.662426E -09
oz(盎司,ounce)(常衡制)	kg	2.834952E -02
oz(金衡制或药衡制)	kg	3.110348E -02
oz(英制流量体积)	m^3	2.841306E -05
oz(美制流量体积)	m^3	2.957353E -05
ozf(盎司力)	N	2.780139E -01
ozf·in	N·m	7.061552E -03
oz(常衡制)/gal(英制液体)	kg/m^3	6.236023E +00
oz(常衡制)/gal(美制液体)	kg/m^3	7.489152E +00
oz(常衡制)/in^3	kg/m^3	1.729994E +03
oz(常衡制)/ft^2	kg/m^2	3.051517E -01
oz(常衡制)/yd^2	kg/m^2	3.390575E -02
USdrypt(pint,美干品脱)	m^3	5.506105E -04
USliqpt(pint,美液品脱)	m^3	4.731765E -04
P(绝对粘度)	Pa·s	1.000000 * E -01
磅[pound(lb,常衡制)]	kg	4.535924E -01
磅[pound(金衡制或药衡制)]	kg	3.732417E -01
lb·ft^2(惯性矩)	kg·m^2	4.214011E -02
lb·in^2(惯性矩)	kg·m^2	2.926397E -04
lb/ft·h	Pa·s	4.133789E -04
lb/ft·s	Pa·s	1.488164E +00
lb/ft^2	kg/m^2	4.882428E +00
lb/ft^3	kg/m^3	1.601846E +01
lb/gal(英制液体)	kg/m^3	9.977637E +01
lb/gal(美制液体)	kg/m^3	1.198264E +02
lb/h	kg/s	1.259979E -04
lb/hp·h(燃耗比,SFC)	kg/J	1.689659E -07
lb/in^3	kg/m^3	2.767990E +04
lb/min	kg/s	7.559873E -03
lb/s	kg/s	4.535924E -01
lb/yd^3	kg/m^3	5.932764E -01

（续）

换算单位	换算成单位	换算因子	换算单位	换算成单位	换算因子
磅达(poundal,英尺-磅-秒制的力单位)	N	1.382550E-01	静电制电荷单位(statcoulomb)	C	3.335640E-10
poundal/ft^2	Pa	1.488164E+00	静电制电容单位(statfarad)	F	1.112650E-12
poundal·s/ft^2	Pa·s	1.488164E+00	静电制电感单位(stathenry)	H	8.987554E+11
lbf	N	4.448222E+00	静电制电导单位(statmho)	S	1.112650E-12
lbf·ft	N·m	1.355818E+00	静电制电阻单位(statohm)	Ω	8.987554E+11
lbf·ft/in	N·m（有误——译者）[⊖]	1.355818E+00	静电制电压单位(statvolt)	V	2.997925E+02
			St(运动粘度)	m^2/s	1.000000*E-04
			ton 吨(化验,assay)	kg	2.916667E-02
lbf·in	N·m	1.129848E-01	ton 吨(英,长,2240lb)	kg	1.016047E+03
lbf·in/in	N·m/m	4.448222E+00	ton 吨(米制)(国际单位制:吨 t。——译者注)	kg	1.000000*E+03
lbf·s/ft^2	Pa·s	4.788026E+01			
lbf·s/in^2	Pa·s	6.894757E+03	ton 吨(TNT 核当量)	J	4.184E+09
lbf/ft	N/m	1.459390E+01	ton 吨(商船登记容积单位)	m^3	2.831685E+00
lbf/ft^2	Pa	4.788026E+01			
lbf/in	N/m	1.751268E+02	ton 吨(美,短,2000lb)	kg	9.071847E+02
lbf/in^2(psi)	Pa	6.894757E+03	ton 吨(长)/yd^3	kg/m^3	1.328939E+03
lbf/lb(推力/重量[质量]比)	N/kg	9.806650E+00	ton 吨(短)/yd^3	kg/m^3	1.186553E+03
			ton 吨(短)/h	kg/s	2.519958E-01
夸脱[quart(美制,干料)]	m^3	1.101221E-03	tf(吨力,2000lbf)	N	8.896443E+03
夸脱[quart(美制,液体)]	m^3	9.463529E-04	tonne(公吨)	kg	1.000000*E+03
			托 Torr(mmHg,0℃)(真空压强单位)	Pa	1.33322E+02
拉德[rad(absorbed dose,吸收辐射剂量单位)]	Gy	1.000000*E-02			
			W·h	J	3.600000*E+03
雷姆[rem(dose equivalent,计量当量)]	Sv	1.000000*E-02	W·s	J	1.000000*E+00
			W/cm^2	W/m^2	1.000000*E+04
伦琴(roentgen)	C/kg	2.58000*E-04	W/in^2	W/m^2	1.550003E+03
rpm(r/min)	rad/s	1.047198E-01	yard	m	9.144000*E-01
″(角度)	rad	4.848137E-06	yd^2	in^2	8.361274E-01
静电制电流单位(statampere)	A	3.335640E-10	yd^3	m^3	7.645549E-01
			yd^3/min	m^3/s	1.274258E-02

注：小数点六位数后带有(*)的表示其后所有的数字均为零，而其余的换算因子则就此圆整。
摘自 ASTM E380 “Standard Practice for Use of the International System of Units(SI)——The Modernized Metric System”。

⊖ 原书有误，应为 N·m/m，对应换算因子为 5.337866E+01。——译者注。

表 1.1-20 腐蚀率的换算

单位	换算因子					
	mdd	$g/m^2/d$	μm/a	mm/a	mil/a	in/a
毫克/[(分米)^2·天],(mdd)	1	0.1	36.5/d	0.0365/d	1.144/d	0.00144/d
克/(米^2·天),($g/m^2/d$)	10	1	365/d	0.365/d	14.4/d	0.0144/d
微米/年,(μm/a)	0.027d	0.00274d	1	0.001	0.0394	0.0000394
毫米/年,(mm/a)	27.4d	2.74d	1000	1	39.4	0.0394
密耳/年,(mil/a,1mil=0.001in)	0.696d	0.0696d	25.4	0.0254	1	0.001
英寸/年,(in/a)	696d	69.6d	25400	25.4	1000	1

注:d——金属密度,g/cm^3。

引自:G. Wranlén, An Introduction to Corrosion and Protection of Metals, Chapman and Hall, 1985, p238。

表 1.1-21 基本物理量常数

物理量名称		符号	数值①	单位
中文	英文			
光速(在真空中)	Speed of light(in vacuum)	c	299,792,458(精确)	$m \cdot s^{-1}$
电子电荷	Electronic charge	e	1.6027733(49)	$10^{-19}C$
普朗克常数	Planck's constant	h	6.6260755(40)	$10^{-34}J \cdot s$
阿伏伽德罗数	Avogadro constant(number)	N_A	6.0221367(36)	$10^{23}mol^{-1}$
原子质量单位	Atomic mass unit	amu 或 u	1.6605402(10)	$10^{-27}kg$
电子静止质量	Electron rest mass	m_e	9.1093897(54) 5.4859903(13)	$10^{-31}kg$ $10^{-4}u$
质子静止质量	Proton rest mass	m_p	1.6726231(10) 1.007276470(12)	$10^{-27}kg$ u
中子静止质量	Neutron rest mass	m_n	1.6749286(10) 1.008664904(14)	$10^{-27}kg$ u
法拉第常数	Faraday constant	F	9.6485309(29)	$10^4C \cdot mol^{-1}$
电子磁矩	Electron magnetic moment	μ_e	9.2847701(31)	$10^{-24}J \cdot T^{-1}$
克分子气体常数	Molar gas constant	R	8.314510(70) 8.205784(69)	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ $10^{-5}m^3 \cdot atm \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
在STP②下的理想气体的克分子数值	Molar value of ideal gas at STP②	V_m	22.41410(19)	
波耳兹曼常数	Boltzmann constant	k	1.380658(12)	$10^{-23}J \cdot K^{-1}$
标准重力(重力加速度)	Standard gravity (gravitational acceleration)	g	9.80665	$m \cdot s^{-2}$
热力学温度	Absolute temperature	$T_{0℃}$	273.150±0.010	K

①括号里数字为所列数最后位数字按内部统一标准偏差的不确定度。 ②STP=标准温度和压力[0℃和(1atm=101.325kPa)或760Torr(1Torr=133.322Pa)]。

引自:J. Res. National Bureau of Standard, Vol 92(No.2)1987, p85-95。

表 1.1-22 希腊字母表

大写	小写	名称(近似中文读音)	大写	小写	名称(近似中文读音)
A	α	Alpha(啊耳发)	N	ν	Nu(纽)
B	β	Beta(贝塔)	Ξ	ξ	Xi(克西)
Γ	γ	Ganuna(嗄马)	O	o	Omicron(奥密克戎)
Δ	δ、∂	Delta(得耳塔)	Π	π	Pi(派)
E	ε	Epsilon(艾普西龙)	P	ρ	Rho(洛)
Z	ζ	Zeta(截塔)	Σ	σ	Sigma(西格马)
H	η	Eta(衣塔)	T	τ	Tau(滔)
Θ	θ、ϑ	Theta(西塔)	Υ	υ	Upsilon(依普西龙)
I	ι	Iota(约塔)	Φ	ϕ、φ	Phi(费衣)
K	κ	Kappa(卡帕)	X	χ	Chi(喜)
Λ	λ	Lambda(兰姆达)	Ψ	ψ	Psi(普西)
M	μ	Mu(谬)	Ω	ω	Omega(欧米嘎)

第2章　金属的组织和性质

Hugh Baker
ASM国际部　咨询编辑

本章的许多内容引自《ASM手册》，第3卷合金相图，1992，1-1～1-29页。还有一些内容引自《二元合金相图》，第3卷，第2版，ASM，1990；《三元合金相图》，第10卷，ASM，1995。

第1节　化学元素

化学元素是基本化学物质，它们既不能通过化学变化分解，也不能通过化学合成生成。这些元素按照一个周期的模式与其各自的相对原子质量相关联，于是它们都被排列在一个简洁的表格里（见图1.2-1中的周期表及相应的表1.2-1和表1.2-2）。正如周期表所示，大部分的元素都有金属的特征，故能利用该表研究各种金属的许多化学（和物理）特性。

表1.2-1　元素名称及其符号（以字母为序）

名称		符号	名称		符号	名称		符号	名称		符号
Actinium	锕	Ac	Chromium	铬	Cr	Indium	铟	In	Nitrogen	氮	N
Aluminum	铝	Al	Cobalt	钴	Co	Iodine	碘	I	Nobelium	锘	No
Americium	镅	Am	Copper②	铜	Cu	Iridium	铱	Ir	Osmium	锇	Os
Antimony	锑	Sb①	Curium	锔	Cm	Iron④	铁	Fe	Oxygen	氧	O
Argon	氩	Ar	Dubnium	𨧀	Db	Krypton	氪	Kr	Palladium	钯	Pd
Arsenic	砷	As	Dysprosium	镝	Dy	Lanthanum	镧	La	Phosphorus	磷	P
Astatine	砹	At	Einsteinium	锿	Es	Lawrencium	铹	Lr	Platinum	铂	Pt
Barium	钡	Ba	Erbium	铒	Er	Lead⑤	铅	Pb	Plutonium	钚	Pu
Berkelium	锫	Bk	Europium	铕	Eu	Lithium	锂	Li	Polonium	钋	Po
Beryllium	铍	Be	Fermium	镄	Fm	Lutetium	镥	Lu	Potassium⑧	钾	K
Bismuth	铋	Bi	Fluorine	氟	F	Magnesium	镁	Mg	Praseodymium	镨	Pr
Bohrium	𨨏	Bh	Francium	钫	Fr	Manganese	锰	Mn	Promethium	钷	Pm
Boron	硼	B	Gadolinium	钆	Gd	Meitnerium	鿏	Mt	Protactinium	镤	Pa
Bromine	溴	Br	Gallium	镓	Ga	Mendelevium	钔	Md	Radium	镭	Ra
Cadmium	镉	Cd	Germanium	锗	Ge	Mercury⑥	汞	Hg	Radon	氡	Rn
Calcium	钙	Ca	Gold③	金	Au	Molybdenum	钼	Mo	Rhenium	铼	Re
Californium	锎	Cf	Hafnium	铪	Hf	Neodymium	钕	Nd	Rhodium	铑	Rh
Carbon	碳	C	Hassium	𨭆	Hs	Neon	氖	Ne	Rubidium	铷	Rb
Cerium	铈	Ce	Helium	氦	He	Neptunium	镎	Np	Ruthenium	钌	Ru
Cesium	铯	Cs	Holmium	钬	Ho	Nickel	镍	Ni	Rutherfordium	铷	Rf
Chlorine	氯	Cl	Hydrogen	氢	H	Niobium⑦	铌	Nb	Samarium	钐	Sm

（续）

名称		符号	名称		符号	名称		符号	名称		符号
Scandium	钪	Sc	Sulfur	硫	S	Thulium	铥	Tm	Vanadium	钒	V
Seaborgium	𬭳	Sg	Tantalum	钽	Ta	Tin⑪	锡	Sn	Xenon	氙	Xe
Selenium	硒	Se	Technetium	锝	Tc	Titanium	钛	Ti	Ytterbium	镱	Yb
Silicon	硅	Si	Tellurium	碲	Te	Tungsten⑫	钨	W	Yttrium	钇	Y
Silver⑨	银	Ag	Terbium	铽	Tb	Ununnilium	鐽	Uun	Zinc	锌	Zn
Sodium⑩	钠	Na	Thallium	铊	Tl	Unununium	錀	Uuu	Zirconiium	锆	Zr
Strontium	锶	Sr	Thorium	钍	Th	Uranium	铀	U			

①符号取自拉丁字 stibium。 ②符号取自拉丁字 cuprum。 ③符号取自拉丁字 aurum。 ④符号取自拉丁字 ferrum。 ⑤符号取自拉丁字 plumbum。 ⑥符号取自拉丁字 hydrargyrum。 ⑦原来的名称为 columbium(Cb)。1948 年 IUPAC 同意将 niobium 作为正式的名称。 ⑧符号取自拉丁字 kalium。 ⑨符号取自拉丁字 argentum。 ⑩符号取自拉丁字 natrium(原文有误,此处漏脚注。译文中加上,后续号顺排。——译者注)。 ⑪符号取自拉丁字 stannum。 ⑫符号 W 源于 wolfram(钨)字,取名于钨矿 wolframite。

表 1.2-2 元素的相对原子质量

原子序数	元素符号	元素名称（中、英）	相对原子质量	注释	原子序数	元素符号	元素名称（中、英）	相对原子质量	注释
1	H	氢 Hydrogen	1.00794(7)	①②③	22	Ti	钛 Titanium	47.867(1)	
2	He	氦 Helium	4.002602(2)	①②	23	V	钒 Vanadium	50.9415(1)	
3	Li	锂 Lithium	6.941(2)	①②③④	24	Cr	铬 Chromium	51.9961(6)	
4	Be	铍 Beryllium	9.012182(3)		25	Mn	锰 Manganese	54.938049(9)	
5	B	硼 Boron	10.811(7)	①②③	26	Fe	铁 Iron	55.845(2)	
6	C	碳 Carbon	12.0107(8)	①②	27	Co	钴 Cobalt	58.933200(9)	
7	N	氮 Nitrogen	14.00674(7)	①②	28	Ni	镍 Nickel	58.6934(2)	
8	O	氧 Oxygen	15.9994(3)	①②	29	Cu	铜 Copper	63.546(3)	②
9	F	氟 Fluorine	18.9984032(5)		30	Zn	锌 Zinc	65.39(2)	
10	Ne	氖 Neon	20.1797(6)	①③	31	Ga	镓 Gallium	69.723(1)	
11	Na	钠 Sodium	22.989770(2)		32	Ge	锗 Germanium	72.61(2)	
12	Mg	镁 Magnesium	24.3050(6)		33	As	砷 Arsenic	74.92160(2)	
13	Al	铝 Aluminum	26.981538(2)		34	Se	硒 Selenium	78.96(3)	
14	Si	硅 Silicon	28.0855(3)	②	35	Br	溴 Bromine	79.904(1)	
15	P	磷 hosphorus	30.973161(2)		36	Kr	氪 Krypton	83.80(1)	①③
16	S	硫 Sulfur	32.066(6)	①②	37	Rb	铷 Rubidium	85.4678(3)	①
17	Cl	氯 Chlorine	35.4527(9)	③	38	Sr	锶 Strontium	87.62(1)	①②
18	Ar	氩 Argon	39.948(1)	①②	39	Y	钇 Yttrium	88.90585(2)	
19	K	钾 Potassium	39.0983(1)	①	40	Zr	锆 Zirconium	92.224(2)	①
20	Ca	钙 Calcium	40.078(4)	①	41	Nb	铌 Niobium	92.90638(2)	
21	Sc	钪 Scandium	44.955910(8)		42	Mo	钼 Molybdenum	95.94(1)	①

（续）

原子序数	元素符号	元素名称（中、英）	相对原子质量	注释	原子序数	元素符号	元素名称（中、英）	相对原子质量	注释
43	Tc	锝 Technetium	[98]	⑤	76	Os	锇 Osmium	190.23(3)	①
44	Ru	钌 Ruthenium	101.07(2)	①	77	Ir	铱 Iridium	192.217(3)	
45	Rh	铑 Rhodium.	102.90550(2)		78	Pt	铂 Platinum	195.078(2)	
46	Pd	钯 Palladium	106.42(1)	①	79	Au	金 Gold	196.96655(2)	
47	Ag	银 Silver	107.8682(2)	①	80	Hg	汞 Mercury	200.59(1)	
48	Cd	镉 Cadmium	112.411(8)	①	81	Tl	铊 Thallium	204.3833(2)	
49	In	铟 Indium	114.818(3)		82	Pb	铅 lead	207.2(1)	①②
50	Sn	锡 Tin	118.710(7)	①	83	Bi	铋 Bismuth	208.98038(2)	
51	Sb	锑 Antimony	121.760(1)	①	84	Po	钋 Polonium	[209]	⑤
52	Te	碲 Tellurium	127.60(3)	①	85	At	砹 Astatine	[210]	⑤
53	I	碘 Iodine	126.90447(3)		86	Rn	氡 Radon	[222]	⑤
54	Xe	氙 Xenon	131.29(2)	①③	87	Fr	钫 Francium	[223]	③
55	Cs	铯 Cesium	132.90545(1)		88	Ra	镭 Radium	[226]	⑤
56	Ba	钡 Barium	137.327(7)		89	Ac	锕 Actinium	[227]	③
57	La	镧 Lanthanum	138.9055(2)	①	90	Th	钍 Thorium	232.0381(1)	①⑤
58	Ce	铈 Cerium	140.116(1)	①	91	Pa	镤 Protactinium	231.03588(2)	⑤
59	Pr	镨 Praseodymium	140.90765(2)		92	U	铀 Uranium	238.0289(1)	①③⑤
60	Nd	钕 Neodymium	144.24(3)	①	93	Np	镎 Neptunium	[237]	③
61	Pm	钷 Promethium	[145]	⑤	94	Po	钚 Plutonium	[244]	③
62	Sm	钐 Samarium	150.36(3)	①	95	Am	镅 Americium	[243]	⑤
63	Eu	铕 Europium	151.964(1)	①	96	Cm	锔 Curium	[247]	③
64	Gd	钆 Gadolinium	157.25(3)	①	97	Bk	锫 Berkelium	[247]	⑤
65	Tb	铽 Terbium	158.92534(2)		98	Cf	锎 Califonium	[251]	⑤
66	Dy	镝 Dysprosium	162.50(3)	①	99	Es	锿 Einsteinium	[252]	⑤
67	Ho	钬 Holmium	164.93032(2)		100	Fm	镄 Fermium	[257]	⑤
68	Er	铒 Erbium	167.26(3)	①	101	Md	钔 Mendelevium	[258]	⑤
69	Tm	铥 Thulium	168.93421(2)		102	No	锘 Nobelium	[259]	⑤
70	Yb	镱 Ytterbium	173.04(3)	①	103	Lr	铹 Lawrencium	[262]	⑤
71	Lu	镥 Lutetium	174.967(1)	①	104	Rf	铷 Rutherfordium	[261]	⑤⑥
72	Hf	铪 Hafnium	178.49(2)		105	Db	𬭊 Dubnium	[262]	⑤⑥
73	Ta	钽 Tantalum	180.9479(1)		106	Sg	𬭳 Seaborgium	[263]	⑤⑥
74	W	钨 Tungsten	184.83(1)		107	Bh	𬭛 Bohrium	[262]	⑤⑥
75	Re	铼 Rhenium	186.207(1)		108	Hs	𬭶 Hassium	[265]	⑤⑥

(续)

原子序数	元素符号	元素名称(中、英)	相对原子质量	注释	原子序数	元素符号	元素名称(中、英)	相对原子质量	注释
109	Mt	鿏 Meitnerium	[266]	⑤⑥	111	Uuu	錀 Unununium	[272]	⑤⑥
110	Uun	鐽 Ununnilium	[269]	⑤⑥					

注：表中数据由IUPAC原子量和同位素丰度委员会提供。更详细的资料可以查询《纯应用化学(Pure Appl. Chem.)》68卷，1996，2339-2359页。

①在已知的地质试件中，元素的所有同位素成分均超过正常材料的限度。在这种试件中元素的相对原子质量与表中所给的相对原子质量之间的差别会超过所述的不确定性。 ②普通天然材料的同位素成分含量大小会影响原子值量的精确测量。故表中所给出的数值只适用于所有普通材料。 ③可以从市场供应的材料中提取各种改性同位素成分，因为它经受过一种尚不清楚或不太多见的同位素分离作用。于是造成实际元素相对原子质量与表中所列的数据之间有相当大偏差。 ④市场供应锂材料的相对原子质量范围介于6.94同6.99之间；如要求得到更精确的相对原子质量值，则必须使用特殊材料进行测定。⑤元素都没有稳定的核素。在方括号里的元素相对原子质量如[209]表示为该元素活性最长的同位素质量数值。然而，三种此类元素(Th、Pa和U)确实具有一种特征性的天然放射性成分，其相对原子质量已在表中列出。 ⑥110至111元素的名称和符号尚在审批中。(在我国《现代汉语词典(第5版)》中的附录中，110是已确定的元素“鐽”。——译者注)上面所用的临时系统是由J. Chatt推荐的，见纯应用化学(Pure Appl. Chem.)51卷，1979，381～384页。元素101至109是在日内瓦召开的IUPAC大会上得到确认的(1997年8月30日发布)。

在周期表(见图1.2-1)中的元素是按照原子序数(原子核中的质子数量)增加的次序而排列，但是那些处于最外层电子轨道上拥有同样电子数量的元素(也就具有相似的化学性质)被编成一组，因此周期表中纵列里的相关元素被称为“族”。随着原子序数的增加，其外层轨道上就会填有更多的轨道电子，并且每当最外一层的轨道被填充时，就意味着新的最外层(即表中的新一周期)开始建立。因为新增的轨道层比原先的轨道层大，即有容纳更多电子的空间，故周期也变得更长：从2(周期1)到8和8(周期2和3)，然后从8到18和18(周期4和5)，直到最后32和(可能的)32(周期6和7)。

多年来，采用不同的规则标明周期表里的每一族。例如，1948年版的《金属手册》使用类似后来理论和应用化学国际联合会(IUPAC)于1970年所采用的系统，该系统里周期表从左边到右边分别由附加的字母A和B进行区分(见图1.2-1)，其差别只是手册用的是小写字母与罗马数字，而不是后来的大写字母。对照在欧洲所通用的1970年IUPAC系统，美国化学协会的化学缩写工作组(CAS)和许多其他美国化学家都用“B”表示周期4～7里的附加族(3～12族)，而用“A”表示其余的族。过去偶尔曾用过的其他规则是以“0”代替ⅧA或ⅧB代表18族，并用阿拉伯数字代替罗马数字。IUPAC最新(1988年)的推荐就是要废除以上两种做法，而以阿拉伯数字1至18代之。

还有的常用做法就是用集体的名称作为相似元素的族名，例如将族1里的锂、钠、钾、铷、铯和钫元素称为碱金属(alkli metals)，其取义于阿拉伯语里的“灰”字(氢因不是固体而不包括在内)。所有族2的元素称之为碱土金属(alkaline earth metals)。尽管IUPAC还未批准，氮族(pnicogens或pnictides)已被用来称呼族15元素，其取义于希腊文里的“窒息、阻塞或扼杀”的词意，意思是指氮气为“经过燃烧的空气”。硫族(chalcogens)用于称呼族16的元素，该词取义于希腊文里“铜”字，最早常指在许多铜矿里有氧和硫的出现，但后来就指所有那些“矿生成物”的元素了。卤素(halogens)一词(源自希腊文里的“盐”字)用于称呼族17元素，族18元素被称为惰性气体或不活泼的气体(*noble gases*或*inert gases*)。氢一般位于族1的最上面位置，但有时它也处于卤素族的最上面位置。

位于各排的相似元素也有类似的命名。例如，从3到10排的元素都有不齐全的*d*亚电子层，被称为过渡元素(*transition elements*)或过渡金属(*transition metals*)。然而，1988年IUPAC把11排的原子归入过渡元素，而其他一些组织则将2至此12排的元素全部归纳进去。元素镧到元素镥(原子序数57至71)称为镧系元素(*lanthanide elements*)、镧系金属(*lanthanide metals*)或简称为镧系(*lanthanides*)。镧系元素同族3元素钇(原子序数39)和钪(原子序数21)都称为稀土元素(*rare earth*)。类似地，元素锕到铹(原子序数89至103)是锕系元素(*elements*)、锕系金属(*actinide metals*)或简称为锕系(*actinides*)(有时也称第二系列稀土)，而从钍到铹(原子序数90至103)的元素也叫放射性元素(*actinoids*)。

	金属											准金属		非金属					
族 IUPAC 1988	1	2	3'	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	IUPAC 1988
族 IUPAC 1970	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		VIIIA		IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB	IUPAC 1970
族 Previous CAS	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB		VIIIB		IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	Previous CAS
1	1 H 氢 +1 -1 1.00794 1																	2 He 氦 0 4.002602 2	K
2	3 Li 锂 +1 6.941 2-1	4 Be 铍 +2 9.0122 2-2											5 B 硼 +3 10.811 2-3	6 C 碳 +2 +4 -4 12.0107 2-4	7 N 氮 +1 +5 +2 -1 +3 -2 +4 -3 14.00674 2-5	8 O 氧 -2 15.9994 2-6	9 F 氟 -1 18.998403 2-7	10 Ne 氖 0 20.1797 2-8	K-L
3	11 Na 钠 +1 22.98977 2-8-1	12 Mg 镁 +2 24.3050 2-8-2											13 Al 铝 +3 26.98154 2-8-3	14 Si 硅 +2 +4 -4 28.0856 2-8-4	15 P 磷 +3 +5 -3 30.97376 2-8-5	16 S 硫 +4 +6 -2 32.066 2-8-6	17 Cl 氯 +1 +5 +7 -1 35.4527 2-8-7	18 Ar 氩 0 39.948 2-8-8	K-L-M
4	19 K 钾 +1 39.0983 -8-8-1	20 Ca 钙 +2 40.078 -8-8-2	21 Sc 钪 +3 44.95591 -8-9-2	22 Ti 钛 +2 +3 +4 47.867 -8-10-2	23 V 钒 +2 +3 +4 +5 50.9415 -8-11-2	24 Cr 铬 +2 +3 +6 51.9961 -8-13-1	25 Mn 锰 +2 +3 +4 +7 54.9380 -8-13-2	26 Fe 铁 +2 +3 55.845 -8-14-2	27 Co 钴 +2 +3 58.9332 -8-15-2	28 Ni 镍 +2 +3 58.6934 -8-16-2	29 Cu 铜 +1 +2 63.546 -8-18-1	30 Zn 锌 +2 65.39 -8-18-2	31 Ga 镓 +3 69.723 -8-18-3	32 Ge 锗 +2 +4 72.61 -8-18-4	33 As 砷 +3 +5 -3 74.9216 -8-18-5	34 Se 硒 +4 +6 -2 78.96 -8-18-6	35 Br 溴 +1 +5 -1 79.904 -8-18-7	36 Kr 氪 0 83.80 -8-18-8	-L-M-N
5	37 Rb 铷 +1 85.4678 -18-8-1	38 Sr 锶 +2 87.62 -18-8-2	39 Y 钇 +3 88.90585 -18-9-2	40 Zr 锆 +4 91.224 -18-10-2	41 Nb 铌 +3 +5 92.90638 -18-12-1	42 Mo 钼 +6 95.94 -18-13-1	43 Tc 锝 +4 +6 +7 (98) -18-13-2	44 Ru 钌 +3 101.07 -18-15-1	45 Rh 铑 +3 102.9055 -18-16-1	46 Pd 钯 +2 +4 106.42 -18-18-0	47 Ag 银 +1 107.8682 -18-18-1	48 Cd 镉 +2 112.411 -18-18-2	49 In 铟 +3 114.818 -18-18-3	50 Sn 锡 +2 +4 118.71 -18-18-4	51 Sb 锑 +3 +5 -1 121.76 -18-18-5	52 Te 碲 +4 +6 -2 127.60 -18-18-6	53 I 碘 +1 +5 +7 -3 126.90447 -18-18-7	54 Xe 氙 0 131.29 -18-18-8	-M-N-O
6	55 Cs 铯 +1 132.90545 -18-8-1	56 Ba 钡 +2 17.327 -18-8-2	La-Lu 镧系	72 Hf 铪 +4 178.49 -32-10-2	73 Ta 钽 +5 180.9479 -32-11-2	74 W 钨 +6 183.84 -32-12-2	75 Re 铼 +4 +6 +7 186.207 -32-13-2	76 Os 锇 +3 +4 190.73 -32-14-2	77 Ir 铱 +3 +4 192.217 -32-15-2	78 Pt 铂 +2 +4 195.078 -32-16-2	79 Au 金 +1 +3 196.9665 -32-18-1	80 Hg 汞 +1 +2 200.59 -32-18-2	81 Tl 铊 +1 +3 204.3833 -32-19-3	82 Pb 铅 +2 +4 207.2 -32-18-4	83 Bi 铋 +3 +5 208.98038 -32-18-5	84 Po 钋 +2 +4 [209] -32-18-6	85 Al 砹 [210] -32-18-7	86 Rn 氡 0 [222] -32-18-8	-N-O-P
7	87 Fr 钫 +1 [223] -18-8-1	88 Ra 镭 +2 [226] -18-8-2	Ac-Lr 锕系	104 Rf 𬬻 +4 [261] -32-10-2	105 Db 𬭊 [262] -32-11-2	106 Sg 𬭳 [263] -32-12-2	107 Bh 𬭛 [262] -32-13-2	108 Hs 𬭶 [265] -32-14-2	109 Mt 鿏 [268] -32-15-2	110 Uun [269] -32-16-2	111 Uuu [272] -32-18-1								-O-P-Q
周期	碱金属	碱土金属													氮族	硫族	卤族	惰性气体	电子运行轨道

镧系	57 La 镧 +3 138.9055 -18-9-2	58 Ce 铈 +3 +4 140.116 -20-8-2	59 Pr 镨 +3 140.9077 -21-8-2	60 Nd 钕 +3 144.24 -22-8-2	61 Pm 钷 +3 [145] -23-8-2	62 Sm 钐 +2 +3 150.36 -24-8-2	63 Eu 铕 +2 +3 151.964 -25-8-2	64 Gd 钆 +3 157.25 -25-9-2	65 Tb 铽 +3 158.92534 -27-8-2	66 Dy 镝 +3 162.50 -28-8-2	67 Ho 钬 +3 164.9303 -29-8-2	68 Er 铒 +3 167.26 -30-8-2	69 Tm 铥 +3 168.93421 -31-8-2	70 Yb 镱 +2 +3 173.04 -32-8-2	71 Lu 镥 +3 174.967 -32-9-2	-N-O-P
锕系	89 Ac 锕 +3 [227] -18-9-2	90 Th 钍 +4 232.0381 -18-10-2	91 Pa 镤 +5 +4 231.0359 -20-9-2	92 U 铀 +3 +4 +5 +6 238.0289 -21-9-2	93 Np 镎 +3 +4 +5 +6 [237] -22-9-2	94 Pu 钚 +3 +4 +5 +6 [244] -24-8-2	95 Am 镅 +3 +4 +5 +6 [243] -25-8-2	96 Cm 锔 +3 [247] -25-9-2	97 Bk 锫 +3 +4 [247] -27-8-2	98 Cf 锎 +3 [251] -28-8-2	99 Es 锿 +3 [252] -29-8-2	100 Fm 镄 +3 [257] -30-8-2	101 Md 钔 +2 +3 [258] -31-8-2	102 No 锘 +2 +3 [259] -32-8-2	103 Lr 铹 +3 [262] -32-9-2	-O-P-Q

图例：序数→50，符号→Sn，原子量→118.71；氧化状态 +2 +4；电子配置 -18-18-4

过渡元素

图 1.2-1 元素周期表。括弧里的数值代表放射性元素寿命最长的同位素的(原子)质量数

如前所述，大部分的化学元素都是金属（*metals*）。（金属一词来自于希腊文“metallon”，其起源于动词，意思为寻找、探索或查询）。在现代科学里，金属就是一切有从其原子外层丢失电子趋势的元素，从而形成的正离子通过所谓金属粘结机理（*metallic bonding*）的自由电子云构成单一的晶体结构。与这种类型的原子粘结相对应的是离子粘结和共价粘结。在离子粘结（*ionic bonding*）里，共价（外层）电子在不同原子之间的转移会分别形成稳定的电子外层，以致正负离子借助库仑力而互相吸引在一起，但并不形成晶体。在共价粘结（*covalentbonding*）中，共价电子是共用的，并不相互交换，而且形成一种非金属晶体。如碳的金刚石形态。

金属晶体里的自由电子云能赋予固体金属三种特性：好的导电性、好的导热性以及光亮的外观。此外大部分的金属都是可锻的、可延伸的，一般其密度也大于其他的元素物质，且通常都形成正离子。那些不能呈现上述金属特性的元素则称为非金属（*nonmetals*）元素（见周期表）。然而有一些元素在某种条件下能起到金属的作用，但在不同的条件下也像非金属，它们被称为半金属（semimetals），也叫做准金属（类金属）。正如周期表里所示，以上三种元素的区分界线并不清晰，只是非金属决不会形成正离子。

第2节　金属元素的晶体结构

晶体结构按照广义的定义就是原子或分子在固体状态中的一种排列。即使是理想的原子/分子排列，晶体结构也包含对于瑕疵或不规则性的考量。这些大大超过单个原子尺度的原子整体排列也就是材料的显微组织。

本文只是简要地复习这些被广泛研究过，且对于冶金工作者来说也是最为重要的定义，以及与晶体结构有关的基本概念。有关晶体结构更为详细的内容可参见《ASM手册》第9卷金相和显微组织以及列于本章结论部分里的精选参考文献。

晶体学术语及其基本概念

晶体是原子或分子在三维方向上以一种重复性模式排列起来的固体。晶体内部的这种原子或分子的排列就叫晶体结构（*crystal structure*）。晶体的单元体（*unit cell*）就是能够被容纳在一个平行六面体里的最小排列模式，该平行六面体的边线构成晶体的 *a*、*b* 和 *c* 轴心线。晶体单元体通过三维聚集形成了空间点阵（*space lattic*）或巴拉维斯点阵（*Bravais lattic*）（见图1.2-2）。

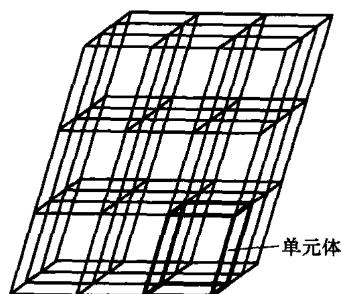


图1.2-2　空间晶格（黑体线表示为一个单元体）

晶体体系。在晶体学中认定了七种晶体体系（*crystal system*），每一种都有一套不同的轴线、单元体边长和轴间角（表1.2-3）。单元体的边线长度（*edge lengths*）*a*、*b* 和 *c* 是分别沿其相应的 *a*、*b* 和 *c* 轴线的方向测量的（见图1.2-3）。单元体的晶面用大写字母表示：晶面 *A* 包含轴线 *b* 与 *c*，晶面 *B* 包含 *c* 与 *a*，晶面 *C* 包含 *a* 和 *b*（见图1.2-3中并未标明晶面）。轴间角 α 处于晶面 *A* 上，角 β 处于 *B* 上，角 γ 处于 *C* 上（见图1.2-3）。

表1.2-3　七种边线长度同轴心角之间的关系

晶体体系	边线长度	轴　间　角	举　　例
三斜晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	HgK
单斜晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	βS，$CoSb_2$
正交晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	αS，Ga，Fe_3C（碳化三铁体）
正方晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	βSn（白色），TiO_2
六方晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90°$，$\gamma = 120°$	Zn，Cd，NiAs
菱形晶系①	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	As，Sb，Bi，方解石
立方晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Cu，Ag，Au，Fe，NaCl

①菱形晶系晶体（有时也称三角晶系）可以用菱形-六方晶系来表述。

晶格尺度。需要指出的是每一种晶体物质的单元体边线长度及其轴间角都是独一无二的。这些长度称为晶格参数（*lattic parameters*）。边线长度也称为晶格常数（*lattic constant*），然而其长度值却不是常数，而是随相域里的成分和温度热胀冷缩的变化而变化的（通常称的晶格参数值都是假设在室温条件下的数值，除非另有规定）。90°和120°的轴间角也会随其成

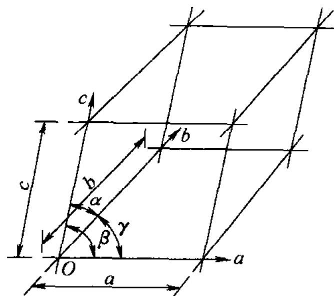


图 1.2-3　晶体线与单元体的边线长度(单元体晶面如图示,为清楚起见未予标明)

分的变化而略有变化。如果单元体的边线长度在三个方向上不相等，那么为了完全定义晶体，所有不等长度都应予以说明。如轴间角不相等亦然。当要定义合金相的单元体大小时，则应考虑到发生于多个单元体之间的晶体排序的可能性。

晶格结点。如图 1.2-2 所示，一个空间晶格可以看成是由直线构成的三维网络。这些直线的交点(叫晶格结点,即 *lattice points*)表征具有特定成分、排列和方位的同类原子或原子组的空间位置。在一个单元里，有五种晶格结点的基本排列形式。前四种为：基本型(简单的)，仅在单元体的角上有晶格结点；基面中心型(端面心的)，在 C 晶面或单元体的端面中心有晶格结点；全面中心型，在所有晶面的中心上都有晶格结点；体内中心型(体心的)，单元体的体积中心有晶格结点。第五种排列为基本菱形六面单元体，可看成是一种分离的基本型排列，将在下一节晶体结构的命名法则中予以介绍。这五种排列分别由下面的大写字母表示：*P* 代表基本立方晶体，*C* 为在两个 C 晶面上有晶格结点的立方晶体，*F* 为全面心立方晶体，*I* 为内心(体心)立方晶体，*R* 则为基本菱形六面立方晶体。

晶体结构的命名法则。当把七种晶体体系与五种空间晶格形式放到一起考虑时，就可以得到如表 1.2-4所列的 14 种组合形式，如图 1.2-4 所示。这 14 种组合形式构成了由威廉 B. 皮尔逊所建立的皮尔逊符号(*Pearson symbols*)，并已广泛地用于确认各种晶体类型。正如表 1.2-4 所示，皮尔逊符号用小写字母代表晶体体系，用大写字母代表空间晶格。在其上面再加上一个等于通常所选定的晶体类型单元体里的原子数量的数字。如要确定单元体里的原子数量，应该记住把每一个与相邻(一个或多个)单元体所共用的原子仅计成一个原子的一部分。图 1.2-5 所示是某些简单金属晶体的皮尔逊符号，以及在其晶体单元里的原子排列示意图。

表 1.2-4　14 种空间(巴拉维斯)晶格及其皮尔逊符号(也见图 1.2-3)

晶体体系	空间晶格	皮尔逊符号
三斜晶系	基本形	*aP*
单斜晶系	基本形	*mP*
	基面中心形①	*mP*
正交晶系	基本形	*oP*
	基面中心形①	*oC*
	体内中心形	*oI*
	全面中心形	*oF*
正方晶系	基本形	*tP*
	体内中心形	*tI*
六方晶系	基本形	*hP*
菱形晶系	基本形	*hR*
立方晶系	基本形	*cP*
	体内中心形	*cI*
	全面中心形	*cF*

①可以选择在其中心有晶格结点的面为 *C* 面(*xy* 面)，用符号 *C* 表示，或用 *A* 或 *B* 表示 *a* 或 *b* 面，因为轴线的选择是任意性的，故不会改变其晶格的实际意义。

晶体可能有许多种形式的晶体结构，其中若干种在金属系统里也许很常见，故常用三个小写字母的缩写形式表示空间晶格与晶体体系的组合。例如，bcc (body-centered cubic)代表体心立方体，即每一个单元体里有两个原子，fcc(face-centered cubic)用于代表面心立方体，即每一个单元体里有四个原子，以及 cph(close-packed hexagonal)表示紧凑型六方体，即每一个单元体里有两个原子(近来在冶金学的文献中，空间晶格/晶体体系也常称其为六方体紧凑型,即 hexagonal close-packed,故也表示为 hcp)。

应当指出的是，在图 1.2-5 所示的示意图中，为原型晶体所勾画的不同种类原子只代表它们的相对尺寸，然而为了更清楚地表示出它们的排列，在实际晶体中，所有的原子看上去都远小于其真实有效尺寸。图 1.2-6 更为真实地代表了三种普通晶体单元体里原子的有效直径。

图 1.2-5 所示的每一种原子排列(及所有其他排列)都是以有效的原子填充和高配位数(*coordination number*)表征的，配位数就是围绕单元体的每一个原子最近的原子数量。fcc 和 cph 的结构有配位数 12，而 bcc 的为 8(再加上稍远处还有邻近的另外 6 个原子)。

空间组合标记(*spac-group notation*)是针对空间晶格和晶体对称性的一种表示符号。它由空间晶格及其后面的字母与代表晶体对称性的数字组成。图1.2-5所示的每一个单元体的空间组合标记都在其旁边标注。

为了便于分类和鉴别每一种晶体结构，都指定一种具有那种结构的代表性物质(元素或相)。所选用的物质称为该结构的结构原型(*structure protype*)。图1.2-5列出了一些能为大家所能接受的金属原型。

许多金属及某些非金属存在一种以上的结晶体形式，这是一种为大家所知道的多晶形(*polymorphism*)现象。如果在单质固体里发现的这种现象就属于众所周知的同素异晶(allotropy)。一般的晶体结构取决于温度和外部压力。例如，在大气压力下，铁在912℃(1674℉)以下的温度里为bcc，在912和1394℃(1674和2541℉)之间为fcc，在1394℃(2541℉)以上直至1538℃(2800℉)，则变回为bcc。钛、锆和铪在加热时都会从cph的结构转变为bcc。还有一个大家所熟悉的例子就是碳：在环境条件下六方晶体石墨

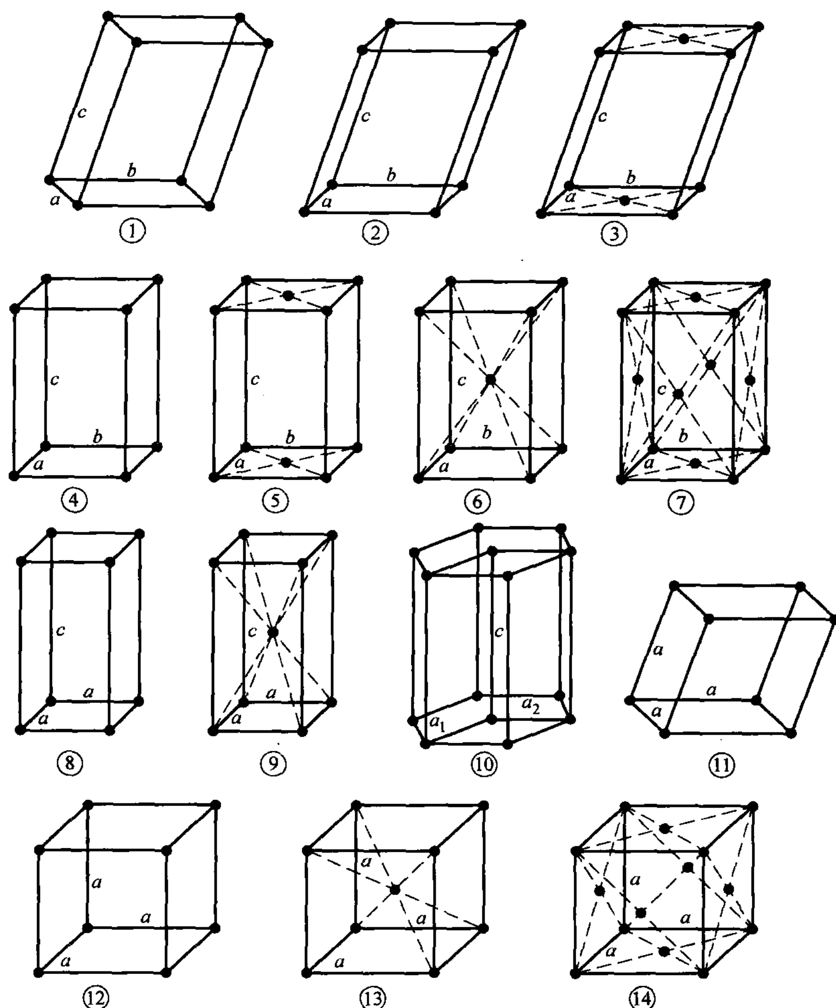


图1.2-4 以一个单元体示意表示14种空间晶格(Bravais lattic)

①三斜晶系，基本形；②单斜晶系，基本形；③单斜晶系，基面中心形；④正交晶系，基本形；⑤正交晶系，基面中心形；⑥正交晶系，体内中心形；⑦正交晶系，全面中心形；⑧正方晶系，基本形；⑨正方晶系，体内中心形；⑩六方晶系，基本形；⑪菱形晶系，基本形；⑫立方晶系，基本形；⑬立方晶系，体内中心形；⑭立方晶系，全面中心形。

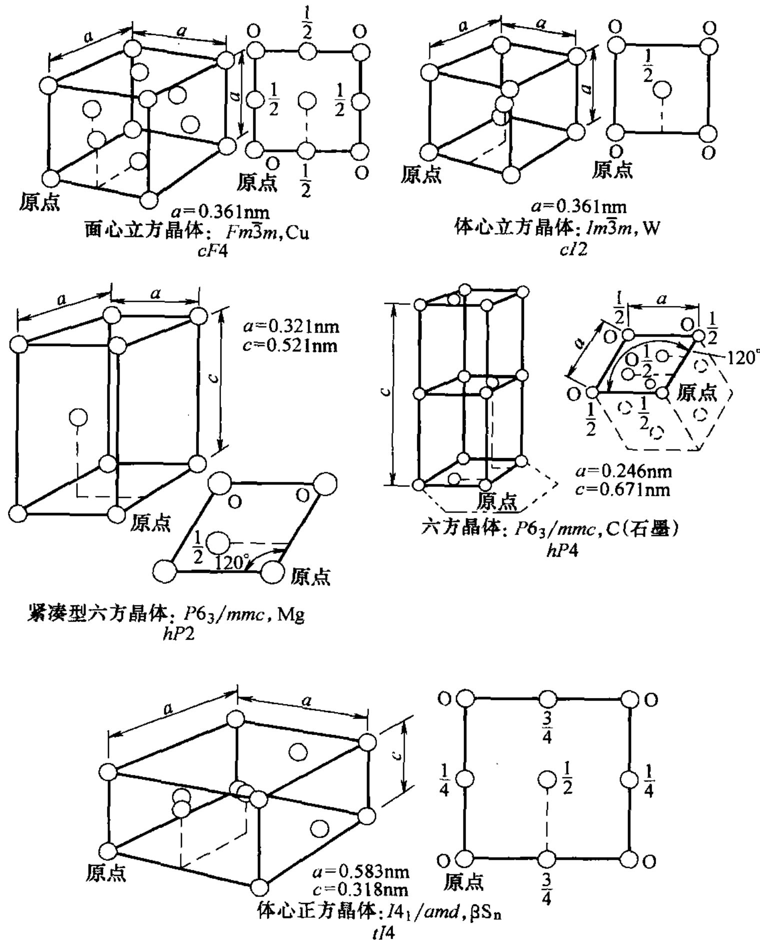


图1.2-5　某些简单金属晶体的单元体和原子位置，还出示了每一种晶体的空间晶格和晶体体系、空间组合的标记及其原型。晶格参数是按原型晶体提供的。为了更清晰地表示原子的排列，图中所示的原子比在实际晶体里的真实有效尺寸要小得多

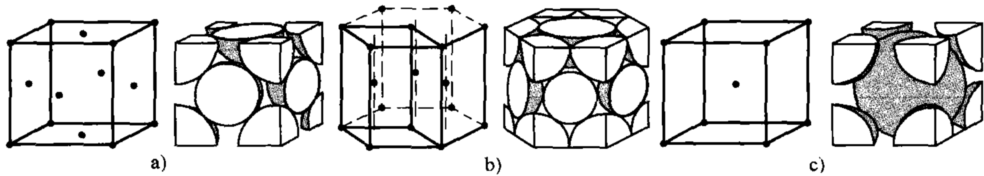


图1.2-6　单元体和原子位置

a）面心立方晶体　b）紧密型六方晶体　c）体心立方晶体

原子的位置如左边图中的圆点所示，而原子的本身却如右边图中所示，这更接近它们的真实有效尺寸。图中所示的原子比在实际晶体里的真实有效尺寸要小得多

是一种稳定的同素异晶体，但在极高压力下变成fcc的同素异晶金刚石。表1.2-5列举了金属元素同素异晶体的皮尔逊符号、空间组和结构原型方面的晶体学数据，还包括与金属元素有许多相似性的双原子和稀有气体的低温结构。

很多年以来，晶体结构的另一重要的资料来源就是《结构报告》(《Structure Report》)(德国为Strukturbericht)。在这本出版物里，晶体的结构分类的规则是由一个大写字母(A为元素，B为AB型的相型，C为AB_2型的相型，D为其他的二元相型，E为三元

相型,L 为超结晶格），之后跟随着一个按照该类型（在每一组内）被宣布的时间次序而指定的数字而组成的。作为在晶体类型里的进一步区分，某些命名中再加上次级字母和数字。因为 Strukturbericht 命名法不能方便又系统地扩展以覆盖目前已经发现的大量晶体结构的类别，所以该系统已趋于不用。《ASM 手册》第 3 卷合金相图的附录给出了 Strukturbericht 命名与皮尔逊符号、空间组合及结构原型之间的关系。

表 1.2-5　金属元素同素异形体的晶体结构和晶格参数

元素	温度/℃	压力①/GPa	皮尔逊符号	空间组	原型	晶格参数②/mm			备注
						a	*b*	*c*	*c/a*，α 或 β
Ac	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.5311	—	—	—
Ag	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.40857	—	—	—
αAl	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.40496	—	—	—
βAl	25	>20.5	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.2693	—	0.4398	1.6331
αAm	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	αLa	0.34681	—	1.1241	2×1.621
βAm	>769	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.4894	—	—	—
γAm	>1077	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	?	—	—	—
δAm	25	>15	*oC*4	*Cmcm*	αU	0.3063	0.5968	0.5169	—
αAr	>−189.2	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.53109	—	—	—
As	25	大气压	*hR*2	*R*3*m*	αAs	0.41319	—	—	α=65.12°
Au	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.40782	—	—	—
βB	25	大气压	*hR*105	$R\bar{3}m$	βB	1.017	—	—	α=65.12°
αBa	25	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.50227	—	—	—
βBa	25	>5.33	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3901	—	0.6154	1.5775
γBa	25	>23	?	?	—	—	—	—	—
αBe	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.22859	—	0.35845	1.5681
βBe	>1270	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.25515	—	—	—
BeII	25	>28.3	*hP*＊	—	—	0.4328	—	0.3416	0.7893
αBi	25	大气压	*hR*2	$R\bar{3}m$	αAs	0.47460	—	—	α=57.23°
βBi	25	>2.6	*mC*4	*C*2/*m*	βBi	0.6674	0.6117	0.3304	β=110.33°
γBi	25	>3.0	*mP*4	$P2_1/m$	—	0.665	0.420	0.465	*P*=85.33°
δBi	25	>4.3	?	?	—	—	—	—	—
ζBi	25	>9.0	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.3800	—	—	—
αBk	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	aLa	0.3416	—	1.1069	2×1.620
βBk	>977	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.4997	—	—	—
Br	<−7.25	大气压	*oC*8	*Cmca*	I_2	0.668	0.449	0.874	—
C(石墨)	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	C(石墨)	0.24612	—	0.6709	2.7258
C(金刚石)	25	>60	*cF*8	$Fa\bar{3}m$	C(金刚石)	0.35669	—	—	—
αCa	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.55884	—	—	—

（续）

元素	温度/℃	压力[①]/GPa	皮尔逊符号	空间组	原型	晶格参数[②]/mm			备注
						a	b	c	c/a，α 或 β
βCa	>443	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.4480	—	—	—
γCa	25	>1.5	?	—	—	—	—	—	—
Cd	25	大气压	$hP2$	$P6_3/mmc$	Mg	0.29793	—	0.56196	1.8862
αCe	< -177	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.485	—	—	—
βCe	25	大气压	$hP4$	$P6_3/mmc$	αLa	0.36810	—	1.1857	2×1.611
γCe	>61	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.51610	—	—	—
δCe	>726	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.412	—	—	—
α'Ce	25	>5.4	$oC4$	$Cmcm$	αU	0.3049	0.5998	0.5215	—
αCf	25	大气压	$hP4$	$P6_3/mmc$	αLa	0.339	—	1.1 015	2×1.625
βCf	>590	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	?	—	—	—
Cl	< -100.97	大气压	$oC8$	$Cmca$	I_2	0.624	0.448	0.826	—
αCm	25	大气压	$hP4$	$P6_3/mmc$	αLa	0.3496	—	1.1331	2×1.621
βCm	>1277	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.4382	—	—	—
εCo	25	大气压	$hP2$	$P6_3/mmc$	Mg	0.25071	—	0.40686	1.6228
αCo	>422	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.35447	—	—	—
αCr	25	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.28848	—	—	—
α'Cr	25	HP	$tI2$	$I4/mmm$	α'Cr	0.2882	—	0.2887	1.002
αCs	25	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.6141	—	—	—
βCs	25	>2.37	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.6465	—	—	—
β'Cs	25	>4.22	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.5800	—	—	—
γCs	25	>4.27	?	—	—	—	—	—	—
Cu	25	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.36146	—	—	—
α'Dy	< -187	大气压	$oC4$	$Cmcm$	α'Dy	0.3595	0.6184	0.5678	—
αDy	25	大气压	$hP2$	$P6_3/mmc$	Mg	0.35915	—	0.56501	1.5732
βDy	>1381	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	(0.398)	—	—	—
γDy	25	>7.5	$hR3$	$R\bar{3}m$	$CdCl_2$	0.3436	—	2.483	4.5×1.606
Er	25	大气压	$hP2$	$P6_3/mmc$	Mg	0.35592	—	0.55850	1.5692
αEs	25	大气压	$hP4$	$P6_3/mmc$	αLa	?	—	—	—
βEs	?	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	?	—	—	—
Eu	25	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.45827	—	—	—
αF	< -227.60	大气压	$mC8$	$C2/c$	αF	0.550	0.338	0.728	β=102.17°
βF	< -219.67	大气压	$cP16$	$Pm\bar{3}n$	γO	0.667	—	—	—
αFe	25	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.28665	—	—	—
γFe	>912	大气压	$cF4$	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.36467	—	—	—
δFe	>1394	大气压	$cI2$	$Im\bar{3}m$	W	0.29315	—	—	—
εFe	25	>13	$hP2$	$P6_3/mmc$	Mg	0.2468	—	0.396	1.603

（续）

元素	温度/℃	压力[1]/GPa	皮尔逊符号	空间组	原型	晶格参数[2]/mm			备注
						a	*b*	*c*	*c/a*，*α*或*β*
αGa	25	大气压	*oC*8	*Cmca*	αGa	0.45186	0.76570	0.45258	—
βGa	25	>1.2	*tI*2	*I*4/*mmm*	In	0.2808	—	0.4458	1.588
γGa	-53	>3.0	*oC*40	*Cmcm*	γGa	1.0593	1.3523	0.5203	—
αGd	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.36336	—	0.57810	1.5910
βGd	>1235	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.406	—	—	—
γGd	25	>3.0	*hR*3	$R\bar{3}m$	αSm	0.361	—	2.603	4.5×1.60
αGe	25	大气压	*cF*8	$Fd\bar{3}m$	C（金刚石）	0.56574	—	—	—
βGe	25	>12	*tI*4	$I4_1/amd$	βSn	0.4884	—	0.2692	0.551
γGe	25	>12→大气压	*tP*12	$P4_12_12$	γGe	0.593	—	0.698	1.18
δGe	LT	>12	*cI*16	$Im\bar{3}m$	γSi	0.692	—	—	—
αH	< -271.9	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.5338	—	—	—
$βH_3$	< -259.34	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3776	—	0.6162	1.632
He_4	-269.67	0.163	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3501	—	0.5721	1.634
He	-269.2	0.129	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3470	—	0.5540	1.597
αHf	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.31946	—	0.50510	1.5811
βHf	>1743	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.3610	—	—	—
αHg	< -38.836	大气压	*hR*1	$R\bar{3}m$	αHg	0.3005	—	—	α=170.35°
βHg	< -194	HP	*tI*2	*I*4/*mmm*	βHg	0.3995	—	0.2825	0.707
αHo	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.35778	—	0.56178	1.5702
βHo	25	>7.5	*hR*3	$R\bar{3}m$	αSm	0.334	—	2.45	4.5×1.63
I	25	大气压	*oC*8	*Cmca*	I_2	0.72697	0.47903	0.97942	—
In	25	大气压	*tI*2	*I*4/*mmm*	In	0.3253	—	0.49470	1.5210
Ir	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.38392	—	—	—
K	25	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.5321	—	—	—
Kr	< -157.385	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.5810	—	—	—
αLa	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	αLa	0.37740	—	1.2171	2×1.6125
βLa	>310	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.5303	—	—	—
γLa	>865	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.426	—	—	—
β′La	25	>2.0	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.517	—	—	—
αLi	< -193	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	Mg	0.3111	—	0.5093	1.637
βLi	25	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.35093	—	—	—
Lu	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.35052	—	0.55494	1.5832
Mg	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.32094	—	0.52107	1.6236
αMn	25	大气压	*cI*58	$I\bar{4}3m$	αMn	0.89126	—	—	—
βMn	>727	大气压	*cP*20	$P4_132$	βMn	0.63152	—	—	—
γMn	>1100	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.3860	—	—	—

（续）

元素	温度/℃	压力[1]/GPa	皮尔逊符号	空间组	原型	晶格参数[2]/mm			备注
						a	*b*	*c*	*c/a*，*α* 或 *β*
δMn	>1138	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.3080	—	—	—
Mo	25	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.31470	—	—	—
αN	<237.54	大气压	*cP*8	*Pa*3	αN	0.5661	—	—	—
βN	<210.004	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	βN	0.4050	—	0.6604	1.631
γN	< −253	>3.3	*tP*4	$P4_2/mnm$	γN	0.3957	—	0.5109	1.291
αNa	< −253	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3767	—	0.6154	1.634
βNa	25	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.42906	—	—	—
Nb	25	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.33004	—	—	—
αNd	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	αLa	0.36582	—	1.1766	2×1.6124
βNd	>863	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.413	—	—	—
γNd	25	>5.0	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.480	—	—	—
Ne	< −248.587	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.480	—	—	—
Ni	5	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.4462	—	—	—
αNp	25	大气压	*oP*8	*Pnma*	αNp	0.6663	0.4723	0.4887	—
βNp	>280	大气压	*tP*4	$P42_12$	βNp	0.4883	—	0.3389	0.694
γNp	>576	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.352	—	—	—
αO	< −249.283	大气压	*mC*4	*C*2*m*	αO	0.5403	0.3429	0.5086	*β*=132.53°
βO	<229.349	大气压	*hR*2	$R\bar{3}m$	βO	0.4210	—	—	*α*=46.27°
γO	<218.789	大气压	*cP*16	$Pm\bar{3}n$	γO	0.683	—	—	—
Os	25	大气压	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.27341	—	0.43198	1.5800
αP(白)	25	大气压	*c*＊＊	—	P(白)	0.718	—	—	—
P(黑)	25	大气压	*oC*8	*Cmca*	P(黑)	0.33136	1.0478	0.43763	—
αPa	25	大气压	*tI*2	*I*4/*mmm*	αPa	0.3921	—	0.3235	0.825
βPa	>1170	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.381	—	—	—
αPb	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.49502	—	—	—
βPb	25	>10.3	*hP*2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3265	—	0.5387	1.650
Pd	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.38903	—	—	—
αPm	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	αLa	0.365	—	1.165	2×1.60
βPm	>890	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	?	—	—	—
αPo	25	大气压	*cP*1	$Pm\bar{3}m$	αPo	0.3366	—	—	—
βPo	>54	大气压	*hR*1	$R\bar{3}m$	βPo	0.3373	—	—	*α*=98.08°
αPr	25	大气压	*hP*4	$P6_3/mmc$	αLa	0.36721	—	1.18326	2×1.6111
βPr	>795	大气压	*cI*2	$Im\bar{3}m$	W	0.413	—	—	—
γPr	25	>4.0	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.488	—	—	—
Pt	25	大气压	*cF*4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.39236	—	—	—
αPu	25	大气压	*mP*16	$P2_1/m$	αPu	0.6183	0.4822	1.0963	*β*=101.97°

（续）

元素	温度/℃	压力①/GPa	皮尔逊符号	空间组	原型	晶格参数②/mm			备注
						a	b	c	c/a，α 或 β
βPu	>125	大气压	mC34	C2/m	βPu	0.9284	1.0463	0.7859	β=92.13°
γPu	>215	大气压	oF8	Fddd	γPu	0.31587	0.57682	1.0162	—
δPu	>320	大气压	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.46371	—	—	—
δ′Pu	>463	大气压	tI2	I4/mmm	In	0.33261	—	0.44630	1.3418
εPu	>483	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.36343	—	—	—
Ra	25	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.5148	—	—	—
αRb	25	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.5705	—	—	—
βRb	25	>1.08	?	—	—	—	—	—	—
γRb	25	>2.05	?	—	—	—	—	—	—
Re	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.27609	—	0.4458	1.6145
Rh	25	大气压	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.38032	—	—	—
Ru	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.27058	—	0.42816	1.5824
αS	25	大气压	oF128	Fddd	αS	1.0464	1.28660	2.44860	—
βS	>95.5	大气压	mP64	$P2_1/c$	βS	1.102	1.096	1.090	β=96.7°
αSb	25	大气压	hR2	$R\bar{3}m$	αAs	0.45067	—	—	α=57.11°
βSb	25	>5.0	cP1	$Pm\bar{3}m$	αPo	0.2992	—	—	—
γSb	25	>7.5	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.3376	—	0.5341	1.582
δSb	25	>14.0	mP3	?	—	0.556	0.404	0.422	β=86.0°
αSc	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.33088	—	0.52680	1.5921
βSc	>1337	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.373	—	—	—
γSe	25	大气压	hP3	$P3_12_1$	γSe	0.42659	—	0.49537	1.1346
αSi	25	大气压	cF8	$Fd\bar{3}m$	C(金刚石)	0.54306	—	—	—
βSi	25	>9.5	tI4	$I4_1/amd$	βSn	0.4686	—	0.2585	0.552
γSi	25	>16.0	cI16	$Im\bar{3}m$	γSi	0.6636	—	—	—
δSi	25	>16→大气压	hP4	$P6_3/mmc$	αLa	0.380	—	0.628	1.653
αSm	25	大气压	hR3	$R\bar{3}m$	αSm	0.36290	—	2.6207	4.5×1.6048
βSm	>734	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.36630	—	0.58448	1.5956
γSm	>922	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	?	—	—	—
δSm	25	>4.0	hP4	$P6_3/mmc$	αLa	0.3618	—	1.166	2×1.611
αSn	<13	大气压	cF8	$Fd\bar{3}m$	C(金刚石)	0.64892	—	—	—
βSn	25	大气压	tI4	$I4_1/amd$	βSn	0.58318	—	0.31818	0.5456
γSn	25	>9.0	tI2	?	γSn	0.370	—	0.337	0.91
αSr	25	大气压	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.6084	—	—	—
βSr	>547	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.487	—	—	—
B′Sr	25	>3.5	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.4437	—	—	—
Ta	25	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.33030	—	—	—

（续）

元素	温度/℃	压力①/GPa	皮尔逊符号	空间组	原型	晶格参数②/mm			备注
						a	b	c	c/a，α或β
αTb	< -53	大气压	oC4	Cmcm	α'Dy	0.3605	0.6244	0.0706	—
α'Tb	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.36055	—	0.56966	1.5800
βTb	>1289	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	(0.402)	—	—	—
γTb	25	>6.0	hR3	$R\bar{3}m$	αSm	0.341	—	2.45	4.5×1.60
Tc	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.2738	—	0.4393	1.604
αTe	25	大气压	hP3	$P3_12_1$	γSe	0.44566	—	0.59264	1.3298
βTe	25	>2.0	hR2	$R\bar{3}m$	αAs	0.469	—	—	α=53.30°
γTe	25	>7.0	hR1	$R\bar{3}m$	βPo	0.3002	—	—	α=103.3°
αTh	25	大气压	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.50842	—	—	—
βTh	>1360	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.411	—	—	—
αTi	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.29506	—	0.46835	1.5873
βTi	>882	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.411	—	—	—
ωTi	25	HP→大气压	hP3	$P6_3/mmm$	ωTi	0.4625	—	0.2813	0.6082
αTl	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.34566	—	0.55248	1.5983
βTl	>230	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.3879	—	—	—
γTl	25	HP	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	?	—	—	—
Tm	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.35375	—	0.55540	—1.5700
αU	25	大气压	oC4	Cmcm	αU	0.28537	0.58695	0.49548	—
βU	>668	大气压	tP30	P4/mnm	βU	1.0759	—	0.5656	—0.526
γU	>776	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.3524	—	—	—
V	25	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.30240	—	—	—
W	25	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.31652	—	—	—
Xe	< -111.758	大气压	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.6350	—	—	—
αY	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.36482	—	0.57318	1.5711
βY	>1478	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	(0.407)	—	—	—
αYb	< -3	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.38799	—	0.63859	1.8563
βYb	25	大气压	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu	0.54848	—	—	1.5929
γYb	>795	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.444	—	—	—
Zn	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.26650	—	0.49470	0.617
αZr	25	大气压	hP2	$P6_3/mmc$	Mg	0.32316	—	0.51475	—
βZr	>863	大气压	cI2	$Im\bar{3}m$	W	0.36090	—	—	—
ωZr	25	HP→大气压	hP2	P6/mum	ωTi	0.5036	—	—0.3109	—

注：括号中的数值为估计值。

①HP，高压。 ②单元体的晶格参数的精度为所示位数的±2。

本表引自《ASM手册》，第3卷合金相图，ASM(国际)，1992，P14-10~14-12。

固溶机理。一种金属晶体溶解不同元素原子的机理只有两种。如果被溶解的原子比起构成溶解晶体的原子足够小，则溶质原子就能被填入较大原子的空隙里形成间隙固溶体(*interstitial solid solution*)(见图1.2-7)。然

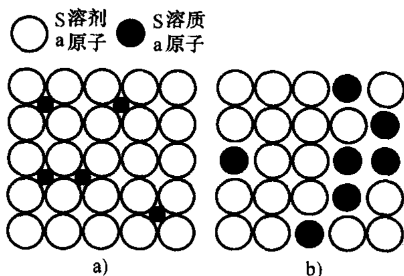


图1.2-7 固溶机理

a) 间隙 b) 替位

而，小到足以填入金属晶体的空隙的溶质原子只有氢、氮、碳和硼(其他的小直径原子如氧则倾向于和金属生成化合物而溶解不进去)。其余的元素是通过替代晶格结点上的溶剂原子溶解进固体金属而成为替位固溶体(*substitutional solid solution*)(见图1.2-7)。当小和大的溶质原子都存在时，其固溶体就同时为间隙和替位。如果还有外来原子，无论以上述哪一种机理进入，都会造成晶格的变形，并增加其内部能量。这种变形能量会导致合金的一些硬化和强化，即所谓固溶硬化。当变形能量达到一个由系统热力学所确定的临界值时，它的溶剂相将因溶质原子而饱和，并同时到达其均质程度的极限。

有序溶剂。如前所述，一些有序合金所具有的周期性结构的单元体数量要超过无序的许多倍，即沿着如图1.2-8所示的一根轴或如图1.2-9所示的两根轴的长周期。由长周期序列(*long-period ordering*)构成的这种超级周期的长度取决于合金系统及其里面的成分。图1.2-8所示是具有一维长列超晶格(*superlattice*)的AuCuⅡ结构，该结构以每五个无序的单元体为一区段，并以此作为反相域(*antiphase domains*)之间的边界。当它呈现为有序的就是正交晶系，反之则为面心立方晶系。图1.2-9所示是一种AB_3型的合金(Cu-Pd，Au-Zn，Au-Mn)的二维长周期超级晶格，它具有以M_1和M_2为区段的反相边界，以及有序的a、b和c单元体尺度。当这种超级晶格呈现为有序的就是正交晶系，反之则为面心立方晶系。

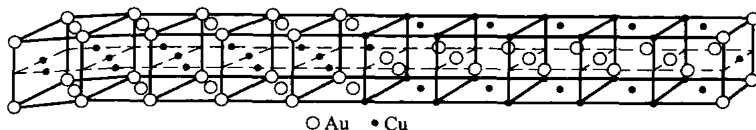


图1.2-8 AuCuⅡ的结构：一维的，长周期超级晶格，存在着以每五个单元体为区间的无序逆相区之间的边界

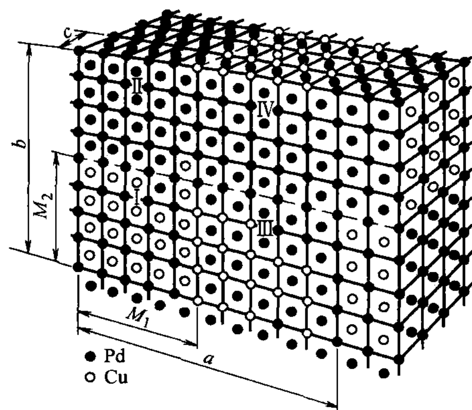


图1.2-9 二维的长周期超级晶格，具有界于M_1和M_2的区间之间的边界，其单元体的尺度a、b和c都是有序的。钯原子在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ区域的小立方体中有着不同的位置

晶体瑕疵和塑性流动

晶体瑕疵对于所有实际晶体都是重要的特点。下面将描述一些最重要的瑕疵。

点缺陷。它们包括作为完整晶体中的原子的缺位。这些缺位的数量随着温度的升高而增加，并通过它们从一个晶格场到另一个晶格场的跃迁造成弥散。

B原子是位于A原子正常且完整的晶格排列中的间隙原子，如在bcc铁素体中的碳原子就填充在铁原子之间的空隙里，这与图1.2-5所示的$cI2$型相似。在一个正常且完整的晶体排列中，替位原子B则占据了本来应由A原子所处的位置上。无论是替位或间隙固溶体里的AB原子，都是另一种常见的点瑕疵的形式。

还有许多成对或成堆出现的点瑕疵，例如双空位、三空位以及成对的间隙-空位。

线缺陷。位错(*dislocations*)就是存在于所有实际晶体中的线缺陷(*line defects*)。线位错(*edge dislocations*)即晶体中不完整的原子面上的边线，如图1.2-10中交叉线所代表的，其中，不完整的平面从半途自上而下地延伸经过晶体，线位错(由一标准符号

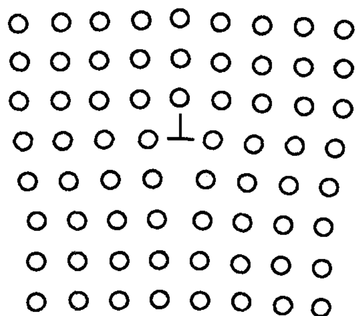


图1.2-10　图示为通过边线错位的截面，它垂直于图示平面，并用符号⊥表示

⊥表示）就是其较下面的边线。

如果由图1.2-11中箭头所示的力作用于一个像图1.2-11a这样一个完整的晶体上，晶体的一部分将发生滑移。如图1.2-11b中的虚线所示的滑移区边缘是一种位错。而靠近晶体前面并垂直于箭头的线左边部分如图1.2-11b所示，则是一种边位错，因为所产生的位移与其位错相垂直。

在图1.2-11b中，滑移变形(*slip deformation*)还形成另一种类型的位错，靠近右侧的滑移区部分，即同位错相平行的位移称为螺旋位错(*screw dislocation*)。在这个部分里，晶体再不是由原子的平行平面构成的，而是由形同螺旋的单一斜面所组成。

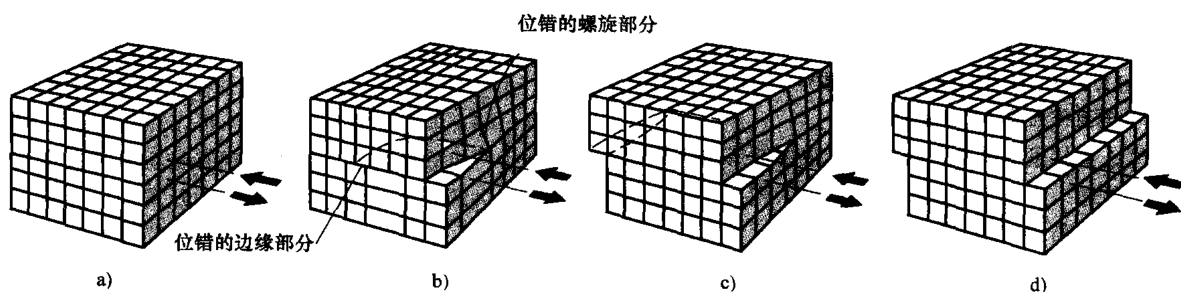


图1.2-11　滑移变形的四个阶段，即一次穿透晶体的位错(由虚线表示)的形成和运动过程
a）发生位移之前的晶体　b）发生一些位移之后的晶体　c）部分晶体上的全部位移　d）整个晶体上的全部位移

随着滑移区延伸越过滑移表面，位错的边缘部分移出晶体、仅留下螺旋部分依然保持连接，如图1.2-11c所示。当所有的位错最后都滑移出晶体，晶体则又成为完整的，只是上面部分相对下面部分移位一个单元体，如图1.2-11d所示。这样，图1.2-11演示了通过滑移过程的塑性流动(*plastic flow*)机理，也就是位错运动的实际流动。

当位错通过一点而发生的位移可以用一个矢量来表达，即所谓的巴格斯(*Burgers*)矢量(**b**)。对应于位错线的矢量方向和对应于矢量方向上单位距离的矢量长度是位错的基本特征。图1.2-11d说明只要在其过程中不产生新的缺陷，完整的晶格经历一次位错后是可以复原的。

在晶体里留下的每一个位错都是局部应力源。这些微应力的性质如图1.2-12中的箭头所表示的，它们(定性地)代表着从围绕着位错的不同位置作用于小小的体积元上的应力，而这些位错都处于原子不完整表面的下边缘上。间隙原子通常都成团地处于由拉应力为其形成较大空间的区域里，如图1.2-12中较下面的中心部分。

有着不同晶格方位的单个晶粒被大角度的界面(即晶界)所分隔。此外，单个晶粒被小角度的界面

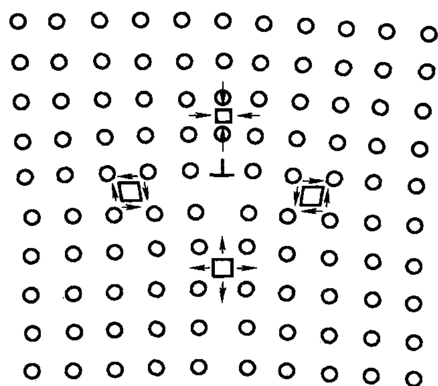


图1.2-12　包含边位错的晶体，在位错附近四个位置上定性地表示里面的应力(如箭头的方向所示)

(亚晶界)分隔成为亚晶粒，它们的方位差异很小。这些亚晶界可以被看成是位错的排列。倾斜的晶界是边位错的排列，扭曲晶界则是螺旋位错的排列。在图1.2-13中，一系列垂直排列的边位错表示成为倾斜晶界。与大角度的晶界相比，小角度的晶界是不太严重的缺陷，较少阻碍塑性流动，而且作为遭受化学腐蚀和合金组分发生偏析的区域作用也较小。一般地说，混合型的晶界缺陷是很普通的。所有的晶界都是让位

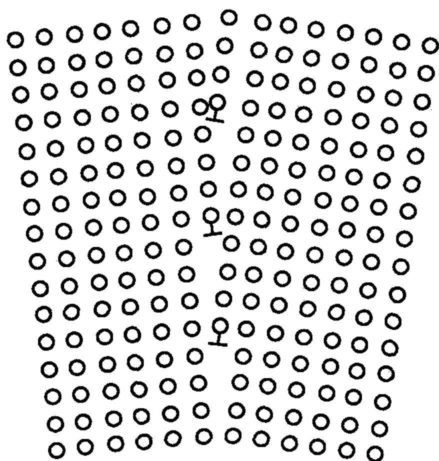


图1.2-13 倾斜型的小角度的晶界(亚晶界),由垂直排列的边缘位错造成

缺和位错在其里面消失的集中地，也可能成为这类缺陷的发源地，它们是蠕变变形中的重要因素。

层积缺陷。这是一种二维的缺陷，它们是原子层的正常堆积次序发生错误的层面。层积缺陷是在晶体生长的过程中形成的。它也会因局部位错(*partial dislocations*)的移动而造成的。对照整体位错(*full dislocations*)即在晶格结点之间发生全距离位移，局部位错就是一种产生短于全距离的运动。

孪晶体。一个晶体中相互之间对应有某种特定取向的各个部分。孪晶关系可能是其中一部分为另一部分的镜像，或者其中一部分与另一部分有着围绕某一晶轴的旋转关系。在液相或气相的结晶过程中，常发生孪晶生长(*growth twin*)，通过在退火过程中的晶粒生长(即重结晶或晶粒生长过程)，或通过如在相转变过程中发生固相之间的互动。由剪切产生的塑性变形也会引起变形孪晶(*deformation twins*)(机械孪晶)。孪晶晶界一般是非常平的，在显微图像中显示为直线；而且是一种能量低于大角度晶界的二维缺陷。因此，孪晶晶界较不容易成为其他缺陷的发源和集中之地，而且其遭受变形和腐蚀作用的活性也小于普通的晶界。

冷作加工。金属在一个不会快速发生退火的温度里的塑性变形叫冷作加工(*cold work*)，该温度主要取决于所针对的金属。冷作加工程度的加大会导致金属内部组织变形的加大，从而使进一步的塑性变形变得较为困难，金属的强度和硬度也因此增加。

精选参考文献

- C.S. Barrett and T.B. Massalski, *Structure of Metals*, 3rd ed., Pergamon Press, 1980.
- T. Hahn, Ed., *International Tables for Crystallography*, Vol A, *Space-Group Tables*, Kluwer Academic Publishers, 1983.
- P. Villars and L.D. Calvert, *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermediate Phases*, ASM International, 1991.

第3节 合金相图及其显微组织

合金相(平衡)图。对于冶金工作者、材料工程师以及材料科学家来说，它在以下四个方面十分有用：①为特定的用途研制新合金；②将合金制成有用的形态；③制订和控制特定合金的热处理工艺，使其获得所要求的力学、物理和化学性质；④解决特定合金在实际应用过程中所产生的一些性能上的问题，以此改善产品的可预测性。在所有这些方面，相图的应用使得研究、开发和生产变得更为有效和经济。

在合金的开发领域里，相图对于现有合金进行的改进已经证明是非常有价值的：可以在目前的应用中避免进行重复性开发，可以为现有及新的应用开发一些经改进的合金，可以为特殊应用开发特种合金，还可以开发一些代用合金或用于代替以稀有、贵重、有害或关键元素作为合金元素的合金。合金相图在工艺上的应用还包括为毛坯、钢锭和钢坯的生产工艺选择合适的技术参数，为铸件和焊缝的微小孔隙和裂纹分析原因和寻找解决方法，通过控制固溶体热处理以防止因早期熔化而造成的损坏，以及开发新的工艺技术。

在功能方面，相图所表示的是合金稳定的热力学相平衡状态，这时即使零件在极端的温度条件下(如汽车排气系统)工作也可期待其合金材料能维持很长的时间。相图还可以用于分析有关使用过程中，诸如点蚀、晶间腐蚀、氢蚀和热腐蚀之类的侵蚀问题。

对于市场上所广泛使用的大多数合金，其允许的成分范围仅涉及很少一部分的有关相图。在实际中常常也会遇到非平衡状态，这就需要更多的相图方面的知识。因此，对于期盼解决上面提及的各方面问题的冶金工作者来说，全面深入地研究合金相图及其实际应用将是非常有益的。

通用术语

相。一切材料都是以气相、液相或固相的形式而存在(即通常所谓的“相”)，并且取决于其状态条件。状态变量包括成分、温度、压力、磁场、静电场、重力场等。术语“相”指的是由物理均质材料所占据的空间范围。然而，该术语有两种用法：通常为物理学家所使用的严格意义和为材料工程师所使用的有点不太严格的意义。从最严格的意义上说，所谓均质就

意味着由相占据的整个空间的物理性质都是绝对一致的，而其状态条件的任何变化——无论变化是多么的小都要造成一个不同的相。例如，一块看上去具有均质外观的固体金属试样并不是真正的单相材料，因为试件的压力条件是随其自重在重力场中的变化而变化的。

在一张相图中每一个单独相域(将在后面的章节里讨论相域)通常都有一个单独的标记，以便于工程师们用于指称处于该区域里的所有材料，而无论材料从其相域的一部分变化到另一部分时，其物理性质的连续变化又有多大。这说明在工程实践中，术语"相"和"相域"之间并没有多大的差别，而且具有相同相的所有材料都用相同的相来称呼。

平衡。有三种类型的平衡状态：稳态、亚稳态和不稳态。图1.2-14表示它们三种状态在力学上的意义。在最低能量条件下的物体处于稳定平衡状态；必须外加能量才能达到真正的稳态时，物体处于亚稳定平衡状态；在达到亚稳态平衡或稳态平衡之前无需外加任何能量，此时物体处于不稳定平衡状态。虽然金属物体真正的稳定平衡状态很少存在，但是平衡系统的研究却极为有价值，因为它构成了赖以评估实际工况的限制性条件。

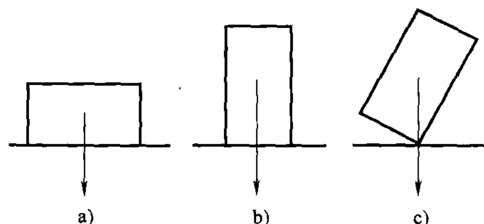


图1.2-14 机械平衡

a) 稳定 b) 亚稳定 c) 不稳定

同质多晶型。在稳定平衡状态下，固体元素和化合物的结构都是呈晶体状的，而且每一种晶体结构都是单一性的。然而有一些元素和化合物是呈同质多晶型(*polymorphic*)的(多形的)，也就是它们的结构会因温度和压力的变化而从一种晶体结构转变为另一种晶体结构，每种单一结构分别形成各异的相。术语同素异形(allotropy)(以另一种形式而存在)也常用于描述化学元素的同质多晶型变化(见本节后的附录2)。

亚稳相。在某些条件下，会形成亚稳定的晶体结构而不是稳定结构。快速凝固是产生亚稳定结构的普通办法，但也有一些(如 Fe_3C 或碳化三铁)是通过中等的缓慢冷却速度而生成的。急速的凝固甚至会生成热力学不稳定结构(如非晶体形金属的"玻璃")

系统。一个物理系统(*system*)是由与周围环境所隔离的一种物质(或一组物质)所组成的，这种概念的提出便于对状态条件所起的作用进行研究。所谓"隔离"的意义就是该系统与其周围的环境不发生物质上的交换。例如，合金系统中的物质可以是两种金属(如铜和锌)、金属和非金属(如铁和碳)、金属和金属间化合物(如铁和渗碳体)，或者若干种金属(如铝、镁和锰)。这些物质成为构成系统的组分(*components*)，但是不应该与系统中所观察到的不同相混为一谈。当然，一个系统也可以由单一组分，如一种元素或化合物构成。

相图。为了记录和观察通过研究状态变量对系统的影响所得到的一些结果，人们设计出各种图形用于表示在平衡条件下系统所呈现的不同相之间的关系。这样的图形就被称之为状态图、平衡图或相图(*constitution diagram*、*equilibrium diagram* 或 *phase diagram*)。单一组分的相图就是将该物质相随温度和/或压力变化所发生的变化表示为一维或二维图形。但是大部分的相图都是描述在由两种或更多的组分构成的系统中相关系的二维或三维图形，而这些相图中除了单一相域外，还包含一些混合相域。在后面的章节里将更为详细地阐述这些常用的示意性图形。

系统组分。相图和由其表述的系统常用系统中的组分数目(以拉丁文表示)来分类和命名的，如下所示：

组分数量	系统或相图的名称(拉丁文)
1	一元(Unary)
2	二元(Binary)
3	三元(Ternary)
4	四元(Quaternary)
5	五元(Quinary)
6	六元(Sexinary)
7	七元(Septenary)
8	八元(Octanary)
9	九元(Nonary)
10	十元(Decinary)

相律。1876年，J. 威尔拉德·基伯斯首先提出将混合的物理状态与其系统的组分数目及其状态相关联的相律。也正是基伯斯最早把系统的均质区域用术语"相"来称呼。当把压力和温度作为状态变量，其规则可用下面的公式表达：

$$f=c-p+2$$

式中，f是独立变量的数目(叫自由度数)，c为系统组分的数目，而p则是系统中平衡相的数目。

一元相图

无变度平衡。按照相规则，三相的稳态平衡只能处于一元相图的单一点的位置上($f=1-3+2=0$)。这个制约由假设的一元压力-温度(pT)图中的0点所代表，如图1.2-15所示。在该图上，三种状态(相)——固、液和气——分别由有相应标记的三个区域代表。在任何二相之间的稳态平衡都发生在它们相互间的边界线上，而在所有三相之间的无变度平衡(*invariant equilibrium*)发生在所谓的三角点(*triple point*)0上，即三条边界线的交点。该点之所以称为无变度点(*invariant point*)是因为图中这个位置上的所有外界控制因素都是固定的(没有自由度)。在这一点上，所有三种状态(相)达到平衡，但是任何压力和/或温度的变化都会引起其中的一种或两种状态(相)的消失。

单一变度平衡。相规则规定在一元系统里，两相之间的稳态平衡允许有一个自由度($f=1-2+2=1$)。这个称之为单一变度平衡(*univariant equilibrium* 或 *monovariant equilibrium*)的条件由图1.2-15中分隔各单一相域的1、2、3三条线所表示，可以自由选择压力或温度，只是两者不能同时自由选择。一旦选定压力，则只有一个温度可以满足其平衡条件；反之亦然。从三角点出发的三条曲线称为三角曲线(*triple curves*)：代表固相与气相之间的反应的线1叫升华曲线，线2为熔化曲线，线3则为蒸发曲线。蒸发曲线的端点4称为临界点，在该处液气相之间的物理差异将不复存在。

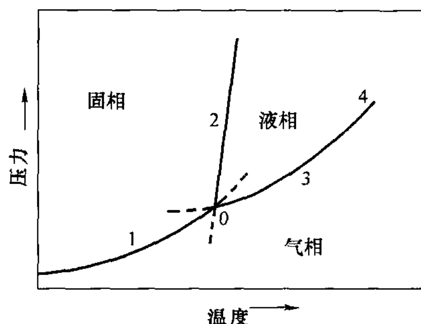


图1.2-15 压力-温度相图

双变度平衡。如果在一元系统中压力和温度都可以自由而任意地选择，那么就相当于有两个自由度的情况，按照相规则只有一种相处于稳态平衡($p=1-2+2$)。这就是双变度平衡(*bivariant equilibrium*)。

二元相图

如果所考虑的系统有两种组分，就有必要在PT图上增加一条成分的轴线，这样就要求图形具有三维结构。然而大部分的冶金学问题所涉及的都是一个大气压的固定压力，所以图形也就简化为温度和成分的二维图形(TX)。

基伯斯的相律可适用于物质的一切状态，即固体、液体和气；可是当压力的影响为常数时，其规则也简化为：

$$f=c-p+1$$

二元系统的稳定状态可以概括如下：

组 分 数	相 数	自 由 度 数	平 衡
2	3	0	无变度
2	2	1	单变度
2	1	2	双变度

可溶混固体。许多系统都是由具有相同晶体结构的组分所构成的，其中一部分系统的组分是完全溶混(即完全相互溶解)的固体形式，以此形成一种连续的固溶体(*continuous sold solution*)。当这种现象出现在二元系统时，其相图通常会有如图1.2-16所示的一般性外观。该相图由两个单相域构成，两者之间间隔着一个两相区。图1.2-16中液相与两相区之间的界线称为液相线，而两相区与固相之间的界线称为固相线。一般，液相线是相图里一些代表系统中不同成分的合金，在冷却过程中开始凝固或者在加热过程中结束熔化的温度的一些点所构成的轨迹；固相线则是

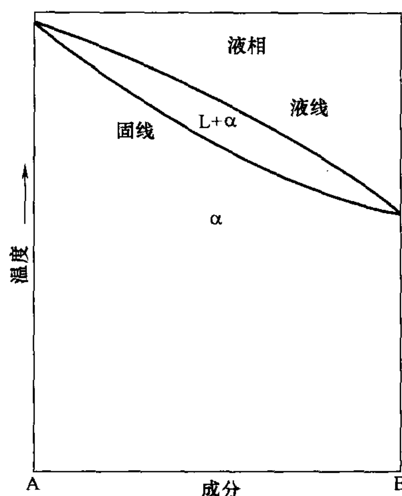


图1.2-16 二元相图，表示液态和固态的可溶性

相图里一些代表系统中不同成分的合金，在冷却过程中结束凝固或者在加热过程中开始熔化的温度的一些点所构成的轨迹。图1.2-16中跨越两相区的平衡相（固液相溶）被称为共轭相（*conjugate phases*）。

如果液相线和固相线在某一点相切，则使两相区在该点的温度达到最高或者最低，并如图1.2-17所示将其分为两部分。如图1.2-18所示，也有可能在单相域里形成一溶混裂隙。T_C 点是一个类似于图1.2-15中点4的临界点，高于该点的相 α_1 和 α_2 变得不易区分。线 a-T_C 和 b-T_C 称为固溶相（solvus）线，由它分别表示组分B在组分A中和组分A在组分B中的溶解度极限。

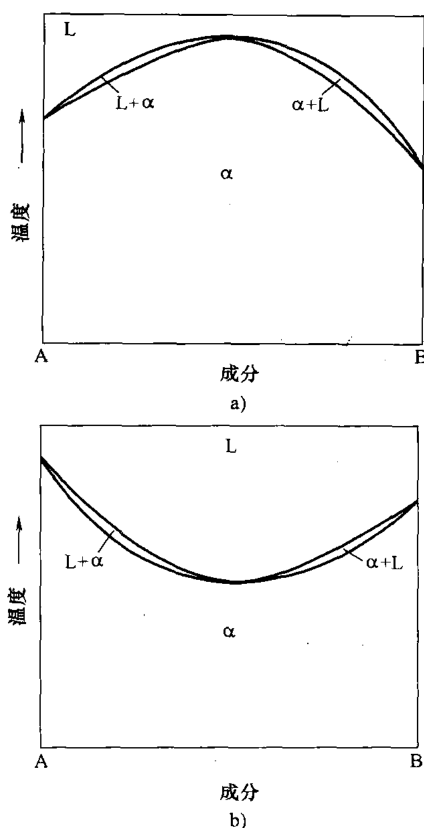


图1.2-17 示有固态可溶性的二元相图，图中的液相线表示最大值和最小值

a）最大值 b）最小值

这些图以及所有其他相图的形态都取决于系统的热力学，正如在本章后面“热力学和相图”一节中将要讨论的。

共晶反应。如果在图1.2-18的固相范围里的两相区经扩张而接触到固相线上的某一点（如图1.2-19a所示），以致完全失去组分的溶混性。相图现在所示的是两个被分隔开的固态终端相（*terminal phase*），而

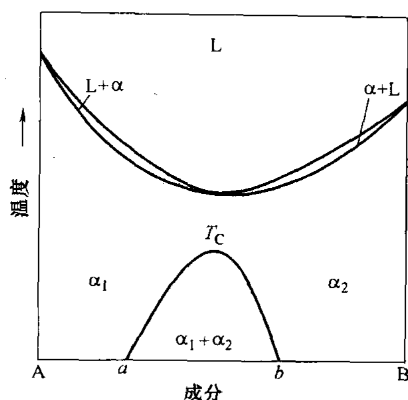


图1.2-18 具有最低液相线的二元相图以及在固态中的可溶性裂隙区

不是单一固相，所以它们作为液态在 P 点处于三相平衡，而 P 点为共生的无变度点（三相平衡将在下一节中讨论）。然而如果该固相范围里的两相区进一步扩大，并使固溶相线不再在无变度点发生接触，相图则通过一系列形态变换最后成为如图1.2-19b所示的更为大家所熟悉的形状。在由一种液相凝固成为两种固相的混合物的无变度点 E 处所发生的三相反应称为共晶（*eutectic*，源于希腊语，意为易于熔化）反应，相应于共晶成分的合金也称为共晶合金（*eutectic alloy*）。含有共晶点左边成分的合金叫做亚共晶合金（*hypoeutectic alloy*，少于之意），右边的合金则为过共晶合金（*hypereutectic alloy*，多于之意）。

在上述的共晶系统里，系统的这两种组分有着相同的晶体结构。正是由于这种相同的晶格结构及一些其他因素促成它们之间的溶混性。然而，共晶系统也可由两种不同的晶体结构的组分构成。作为这种情况，相对各个终端相（见图1.2-19c）的液相线和固相线（及其进入其两相区的延伸线），就类似于如图1.2-16所示的在系统组分之间完全相溶混情况下的液相线和固相线。

三相平衡。包括三种共轭相的反应并不仅限于共晶反应。举例说，单一固相通过冷却会变成两种新固相的混合体，或者两种固相经过冷却又会反应形成一种新的固相。从二元系统里看到的这些以及其他类型的无变度反应都已列于表1.2-6里，并由图1.2-20和图1.2-21所示。

居间相。除了三个终端固相域 α、β 和 ε 以外，从图1.2-20所示的相图中可看到中间组分的其他五个固相域 γ、δ、δ′、η 和 σ。这样的相称为居间相（*intermediate phase*）。如图1.2-20所示，许多居间相都有相当广的均质性范围。但是也有许多其他居间相的均质性非常有限，或者根本就没有明显的均质范围。

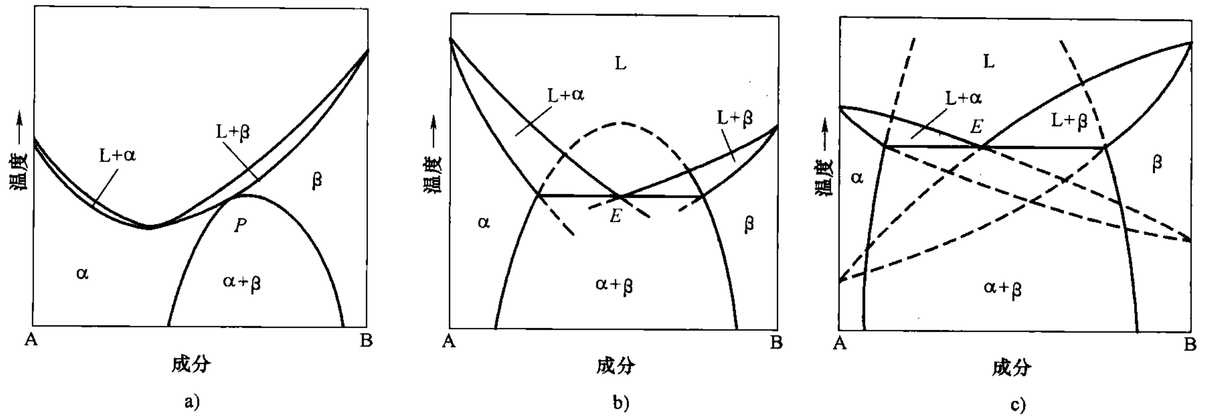


图 1.2-19 无变度点的二元相图： a)除了固相中的可溶性裂隙在 *P* 点与固相线接触之外，均如图 1.2-18 的次低型相图所示，这种类型的相图实际上大概都是不存在的。b 和 c)是典型的共晶相图，b)的组分有相同的晶体结构，c)的组分有不相同的晶体结构，共晶(无变度)点用 E 标记。b)和 c)中的虚线是其稳态平衡线的亚稳态的延长线。

表 1.2-6 无变度反应

种类		反应
共晶的(包含液体和固体)	L_1 ∨ L_2 >———< S	偏晶的
	L ∨ S_1 >———< S_2	共晶的
	S_1 ∨ L >———< S_2 (亚共晶的)	次低共晶的
共析的(仅包括固体)	S_1 ∨ S_1 >———< S_2	偏析的
	S_1 ∨ S_2 >———< S_3	共析的
包晶的(包括液体和固体)L_1	L_1 >———< L_2 ∧ S	综晶的
	L >———< S_1 ∧ S_2	包晶的
包析的(仅包括固体)S_1	S_1 >———< S_2 ∧ S_3	包析的

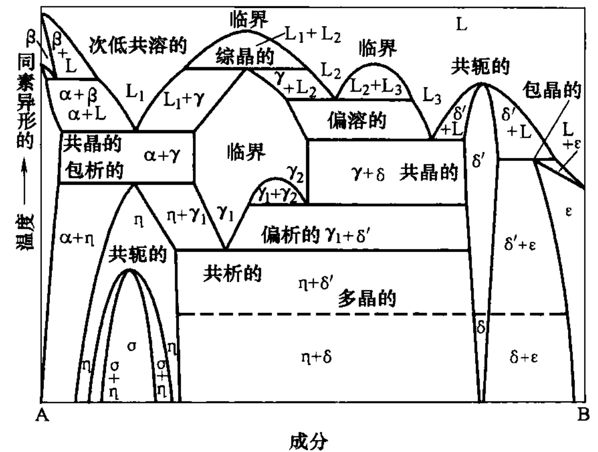


图 1.2-20 假想的二元相图，表示通过不同无变度反应和多晶形转变所形成的各种居间相

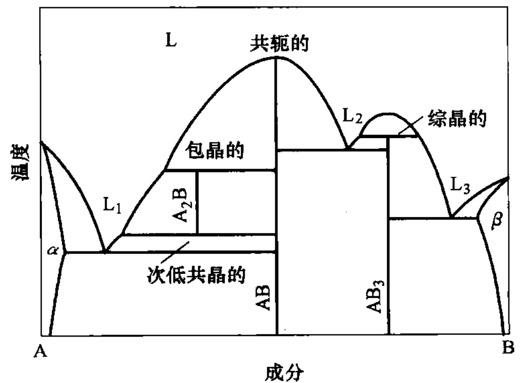


图 1.2-21 假想的二元相图，表示三种金属间化合物和四种熔化反应

当有限(或无)均质范围的居间相正好处于或接近反映了组分原子在相的晶体结构里正常定位的一个特定组分元素比时，常称其居间相为化合物(或线性化合物)。当系统的化合物是金属性的，这样的居间相又常称为金属间化合物。(金属间化合物不应与化学上的化合物相混淆，后者的连接键的类型与晶体的是不一样的，而且其化合比也是有明确的化学意义的)。图1.2-21出示了三种金属间化合物(具有四种类型的熔化反应)。

在图1.2-21所假设的相图里，一种AB成分的合金将在等温的条件下凝固和熔化，其液体或固体不会发生成分上的变化，这样的相变称之为同成分的(*congruent*)。而所有其他反应都是非同成分的(*incongruent*)，即熔化时由一相变成两相。然而同成分的和非同成分的并不仅限于线性化合物：例如，终端组分B(纯相ε)和如图1.2-20中的居间相δ′的最高熔点成分都是等同地凝结和熔化，而以其他成分的ε和δ′都是不等同地凝固和熔化。

亚稳态平衡。在图1.2-19c中的虚线表示在两相区里消失了的液相线和固相线。这些虚线代表了一种有价值的信息，即它们表示在亚稳态平衡下所存在的一种状态，从理论上说这种情况可能发生在急速冷却的过程里。在图1.2-15和图1.2-19b里都出现某些稳态平衡线的亚稳态延长线。

三元相图

当在二元系统中加入第三种组分时，在二维图中所表示的平衡状态将变得更加复杂。一种办法就是在基本坐标系上增加第三成分的维，形成一种以二元相图作为其垂直侧面的固相图。这可以由经改进了的等角投影代表，如图1.2-22所示。这样，单一相域(二元相图中的液相线、固相线和固溶线)的边界都将变成表面，而单、双相的范围则变成体积，三相线也变成体积，并且在图1.2-22中无法显示的四相交汇可以作为无变度面而存在。二元共晶液体的成分作为双组分系统的一个点在三元相图里就变成了一条线，如图1.2-22所示。

尽管三维投影对于理解相图中的各种关系是很有帮助的，但是要从中读取数值还很困难的。因此三元系统常用二元相图的方式来表示，这些二元相图包含一些面与液相和固相表面的二维投影，以及一系列的通过固体相图的二维水平截面(等温，*isotherms*)和垂直截面(等浓度，*isopleths*)。

垂直截面。常可通过一个角(一种组分)和处于与之相对的那个面上的同成分熔化二元化合物得到垂

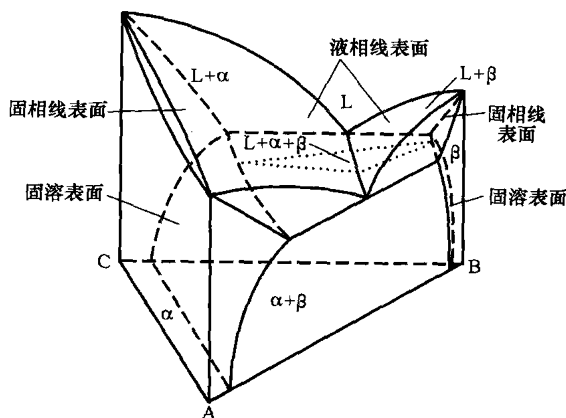


图1.2-22 三元相图，表示三相平衡。引自参考文献[1]

直截面，若将此图形像其他任何实际二元相图一样地进行解读，可以把它称为拟二元截面。如图1.2-23所示，等温截面上的线1—2就是一种用于表示这种截面的可能性。在一个表面上的同成分熔化二元化合物与另一不同表面上一个化合物之间的垂直截面也能构成拟二元截面(见线2—3)。

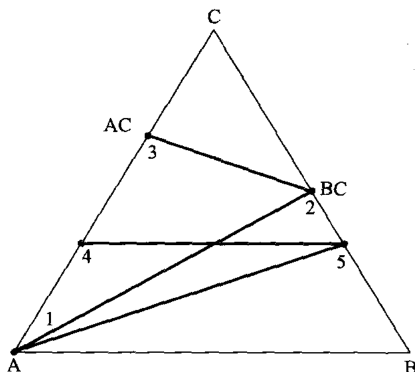


图1.2-23 三维相图上的等温截面，为简化相边界予以省略

所有其他垂直截面都不是真实的二元相图，故都用术语伪二元(*pseudobinary*)称呼它们。一种普通的伪二元截面就是其上面一种组分的百分比保持不变(其截面平行于其中的一个表面)的截面，如图1.2-23中的线4—5所示；另一种就是两种成分的比值为常数，而第三种成分的含量为0%~100%(线1—5)。

等温截面。在等温三角截面中的成分含量可以从平行于表面的三组线所构成的三角形网格求得，而这些平行线之间则保持规律性的成分间隔(见图1.2-24)。通常，三角形的顶点设置在图形的最高点，组分A定在底线的左边，B在底线的右边，则C在最高点。组分A的含量一般由C点向A点表示，组分

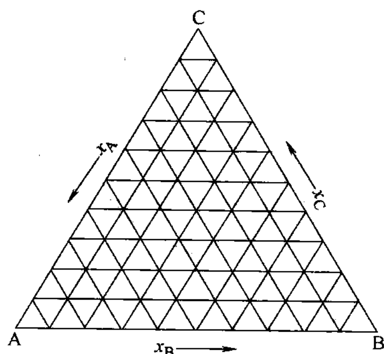


图 1.2-24 等温截面上的三角形成分网格，x 为每一种组分的摩尔克分子数或百分数

B 的含量由 A 点向 B 点表示，而组分 C 的含量由 B 点向 C 点表示。当图形只显示出一个角的区域时，这种刻度的设置往往需要修改。

投影视图。从本质上说，液相线、固相线和固溶线都不是等温的。所以，通常还要在这些表面的投影视图加上同等温度（等温）的轮廓线来表示表面的形状（见图 1.2-25）。除了（或替代）轮廓线之外，视图还要在两个表面的交界处出示形成的温度低谷（也称为山谷或沟槽）的一些线。这些线上经常加上箭头，以表明低谷处温度的降低方向。

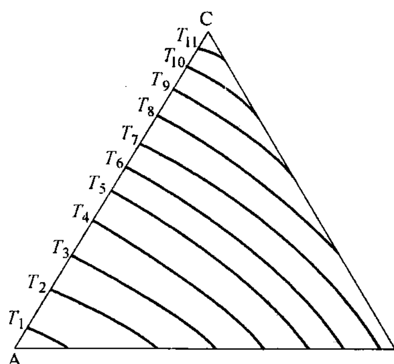


图 1.2-25 三元相图中的液线投影图，所示的为等温轮廓线。摘自参考文献[1]

热力学原理

组分之间的反应、系统中相的形成和最后相图的形状，都可以用热力学原理、定律和术语的知识来解释和理解，以及如何将其应用于系统里。

内部能量。一个系统的运动能量（运动的能量）与位能（储存的能量）之和称之为内部能量（*internal energy*）E。内部能量只能用系统的状态表征。

封闭系统。一个不与周围交换质量（材料）的系统叫做封闭系统（*closed system*）。但封闭系统可以与周围交换能量。

第一定律。热力学第一定律（*First law of thermodynamics*）是 19 世纪 40 年代由裘勒斯·冯·梅厄、詹姆斯·丘尔和霍曼·冯·海尔姆霍尔兹提出，它规定："能量既不能创生也不能消灭"。所以它称为能量守恒定律。这个定律的意思是一个与外隔绝的系统在整个操作运行过程中，其总能量保持不变；也就是说，一定量的能量以一种形式从系统里消失，必然有等量的能量以另一（或几种）种的形式出现。

以一个封闭的气体系统为例，让其增加 δQ 的热能，并让其消耗掉 δW 的做功的能量，第一定律计算该系统的内部能量变化 dE 如下式所示：

$$dE = \delta Q - \delta W$$

在绝大多数的工业过程和材料应用中，仅由一个系统做功或对一个系统做功，则只限于压力/体积间的关系。除了电解沉积和电提炼过程，如铜、铝、镁、碱金属和碱土金属的生产过程以外，任何由电场、磁场和重力场引起的能量变化都可以忽略不计。由于忽略场的效应可以用体积变化 dV 的总和乘以产生各项变化的压力的总和来度量由系统所做的功。故当忽略场效应，第一定律可以表示为：

$$dE = \delta Q - p dV$$

焓。用焓（*enthalpy*）H 来表示一个系统在恒定压力下的热能变化（任何场效应忽略不计）是最方便的。焓也称之为热容量（*heat content*），定义为：

$$H = E + pV$$

焓也如内能一样，是系统状态的函数，即乘积 pV。

热容量。一种物质的热容量 C 就是将其温度升高 1K 所需要的热量，即：

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

然而，如果物质的体积保持不变（即 $dV = 0$），则：

$$\delta Q = dE$$

和

$$C_v = \left(\frac{\delta Q}{\delta T}\right)_v = \left(\frac{\delta E}{dT}\right)_v$$

如果，物质的压力保持不变（正如在许多冶金系统里），则：

$$C_p = \left(\frac{dE}{dT}\right) + \left(\frac{p dV}{dT}\right)_p$$

和

$$C_p = \left(\frac{d(E + pV)}{dT}\right)_p$$

$$C_p = \left(\frac{dH}{dT}\right)_p$$

第二定律。第一定律虽然建立了吸收热与系统做功之间的关系，却没有指明热量源或其流动的方向。然而这正是由鲁道夫·克劳修斯和威廉·汤姆斯（罗德·凯尔芬）提出的热力学第二定律（*Second law of thermodynamics*）所解决的。第二定律指出：“热量总是自发地从高温物体流向低温物体”。换而言之，“一切自然发生的过程都是自发趋向于达到平衡的方向”。

熵。用术语熵 S 进行表述第二定律是最方便的，是一切系统所拥有的另一种性质。熵代表了系统中无法做功的能量（以热力学温度 T 的 K 表示）。按照熵的意思，第二定律指出“一切自然过程的发生都是倾向于熵的增加，而且过程的方向总是导致熵的增加”。对于一个在与周围环境保持平衡的系统里所发生的过程，熵的变化定义为：

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{dE + pdV}{T}$$

第三定律。由希尔道·理查德、沃尔特·纳恩斯特和马克西·帕兰克等人所提出的原理被称为热力学第三定律（*Third law of thermodynamics*），它指出“在热力学温度零度（0K）下，一切化学均质的材料的熵都取值为零”。

吉布斯能量。因为 S 和 V 都很难用实验来控制，因此引入一个术语叫吉布斯能量（*Gibbs energy*）G，故有：

$$G \equiv E + pV - TS \equiv H - TS$$

和

$$dG = dE + pdV + Vdp - TdS - SdT$$

然而，

$$dE = TdS - pdV$$

所以，

$$dG = Vdp - SdT$$

此处，可以用两个独立的变量——压力和热力学温度表达经历某一过程的吉布斯能量，而它们很容易通过实验予以控制。如果过程是在常压和常温的条件下进行，则与周围环境保持平衡的一个系统的吉布斯能量变化等于零。对于一个自发变化（即不可逆）的过程，吉布斯能量的变化小于零（为负值），即吉布斯能量在其过程中减小，当达到平衡时为最小值。

热力学和相图

相图的区域中的点、线、表面及其里面的交叉都受控于热力学原理和构成系统的所有相的热力学性能。

相域规则。相律规定，在常温和常压的条件下，多组分相图中的相邻区域的相数必须相差1。

勒·夏式列（Le Châtelier）定理。基于热力学原理，亨利·勒·夏式列（*Henri Le Châtelier*）定理认为：“如果一个处于平衡的系统受到一种使平衡发生改变的制约，那么就会发生一种反应抵御这个制约，即一种使平衡的改变被部分消除的反应”。从图1.2-15可看出该定理对于几条线的影响。升华线（1）和蒸发线（3）的斜率表明系统是通过使较为浓缩的相（固体和液体）在较高压下变得更加稳定的方式对压力的增高发生作用的。而融化线（2）的斜率表明这种假设的物质在凝固时的收缩（注意在液相水和通常在凝固时，会发生膨胀的冰之间的边界线朝着压力坐标轴的方向倾斜）。

克劳修斯-柯拉庇隆（Clausius-Clapeyron）方程。比诺伊特·柯拉庇隆和鲁道夫·克劳修斯将勒·夏式列定理进一步量化为下面的方程式：

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H}{t\Delta V}$$

式中，dp/dT 为图1.2-15的 pT 图中所示的单变度线的斜率；ΔV 是反应中的两相克分子体积差；ΔH 是两相的克分子焓差（反应热）。

溶液。相图中的液相线、固相线和溶解度曲线（或表面）的形状是由相关相的吉布斯能量所确定的。在这种情况下，吉布斯能量必须不仅包括所构成组分的能量，还要有相里的这些组分混合的能量。

现以图1.2-16所示的完全可混性的情况为例来进行说明。固体 α 和液体在液相线和固相线之间的二相域里处于稳定平衡状态。在不同温度下，都可以把吉布斯能量作为A、B两种组分的理想液体溶液和理想固溶体的成分函数进行计算。其结果就如同图1.2-26a～e的一系列图形所示。

在温度 T_1，液体溶液具有较低的吉布斯能量，因此是较为稳定的相。在温度 T_2，即A的融化温度，只有纯A成分时才有液体和固体的同等稳定。在温度 T_3，即A和B的融化温度之间，吉布斯能量曲线交叉。温度 T_4 是B的融化温度，而 T_5 是在其之下。

在图1.2-26f的相图中，固体加液体的两相区的构建如下所述。按照热力学原理，在温度 T_3 处于相互平衡状态的两相成分可以通过构建与图1.2-26c中两条曲线相切的一条直线来确定。然后，将两个切点1、2分别作为固相线和液相线上的点转移到相图上。以足够多点的温度重复以上步骤便可精确地作出其曲线。

如果在某一温度，作为液体和固体的吉布斯能量

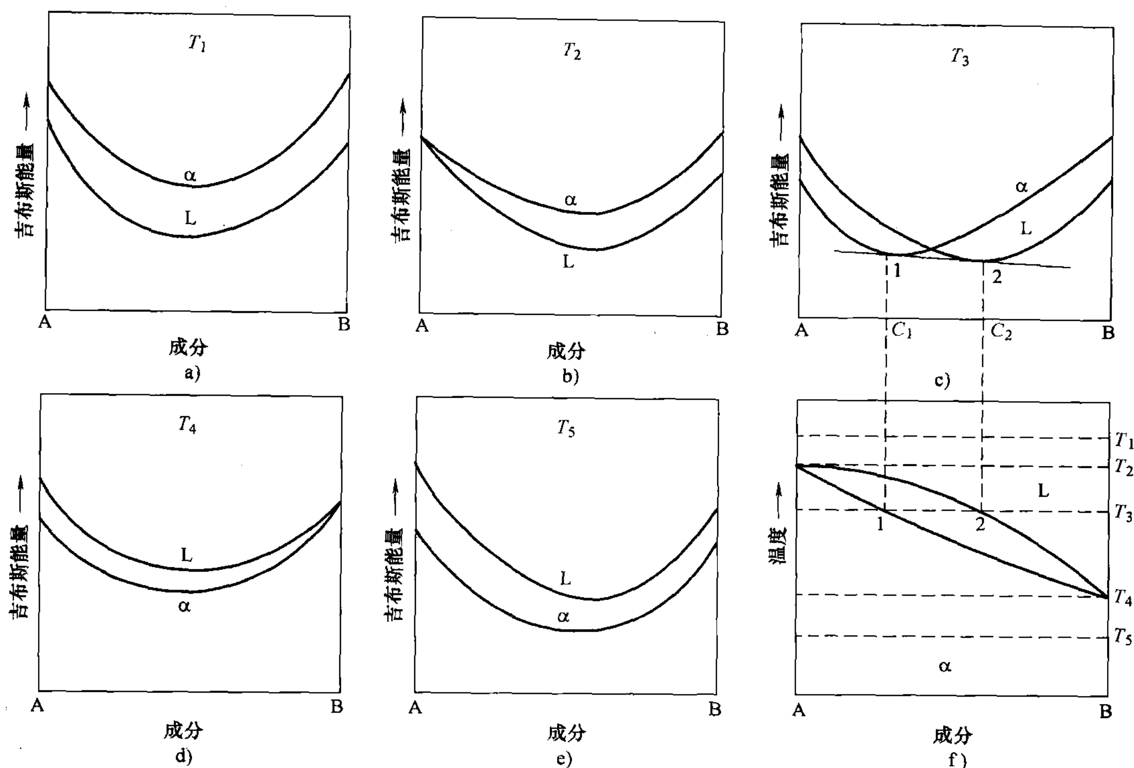


图 1.2-26 利用吉布斯能量绘制二元相图，由其表明固、液两种状态的完全可溶性。摘自参考文献[2]

曲线相切于某一点，这样就形成与图 1.2-17a 和 1.2-17b相类似的相图，即在液相线和固相线上出现最大值和最小值。

混合物。图 1.2-26f 中的两相区是由液相和固相的混合物构成的。如上所述，在温度 T_3 达到平衡的两相成分为 C_1 和 C_2。这两者成分和 T_3 温度相交于点 1 和 2，连接这两点的水平等温线称为连接线(*tie line*)。用类似的连接线连接遍布在所有二元(面积)和三元(体积)系统的两相区(面积)中的共存相，而连接三角形(*tie triangle*)则用于连接遍布在所有三元系统的三相区(体积)中的共存相。

共晶相图也可以通过吉布斯能量曲线绘制，它的一个特点就是有一个双固相混合区。考虑图 1.2-27f 相图所示的温度及对应这些温度的吉布斯能量(见图 1.2-27a ~ 1.2-27e)。当把能量曲线上的切点都转移到相图上时，最后得到典型的共晶系统相图形状。通过共晶点 10 冷却而形成的固体 α 和 β 混合体具有一种特殊的显微组织，后文中再予以讨论。

也可以利用适当的吉布斯能量曲线构建具有三相反应，而不是共晶反应的二元相图以及具有多重三相反应的相图。同样的，利用吉布斯能量表面和相切平面也可以构成三元相图。

曲线和交点。热力学原理还制约着不同的边界曲线(或表面)的形状及其交点。例如图 1.2-15 所示的 pT 图。克劳修斯-柯拉庇隆方程要求在图 1.2-15 所示的三条曲线的交点上，相邻两条曲线间的夹角不得大于 180°，或者说每两相之间的第三条曲线的延长线必须落于第三相的区域之内。

在两相区的边界交汇处的夹角也是受制于热力学。也就是说，其夹角的每一条边线超越其交汇点的延长线都必须突入两相区里而不是单相域内。图 1.2-19b所示就是作为一个正确的交汇点的例子，图中固相线和溶解线都是凹形的。可是，两条边界线的曲率不一定是凹形的。

等成分转变。相图上的固液等成分点就是相同的成分而能使不相同的相保持平衡的地方。根据 J. · 韦拉德 · 吉布斯的热力学表达式，迪米特里 · 科诺沃洛夫进一步为等成分点提出了吉布斯-科诺沃尔洛夫法则，该法则规定：位于等成分转变处的相边界斜率必须为零(沿水平方向)。图 1.2-17 所示就是液相曲线和固相曲线上最大点和最小点处有正确斜率的例子。

较高阶的转变。迄今为止，本章所讨论的转变都还局限于普通的热力学型，即称为第一阶转变(*first-order transition*)，也就是有着不同的晶格参数、焓、

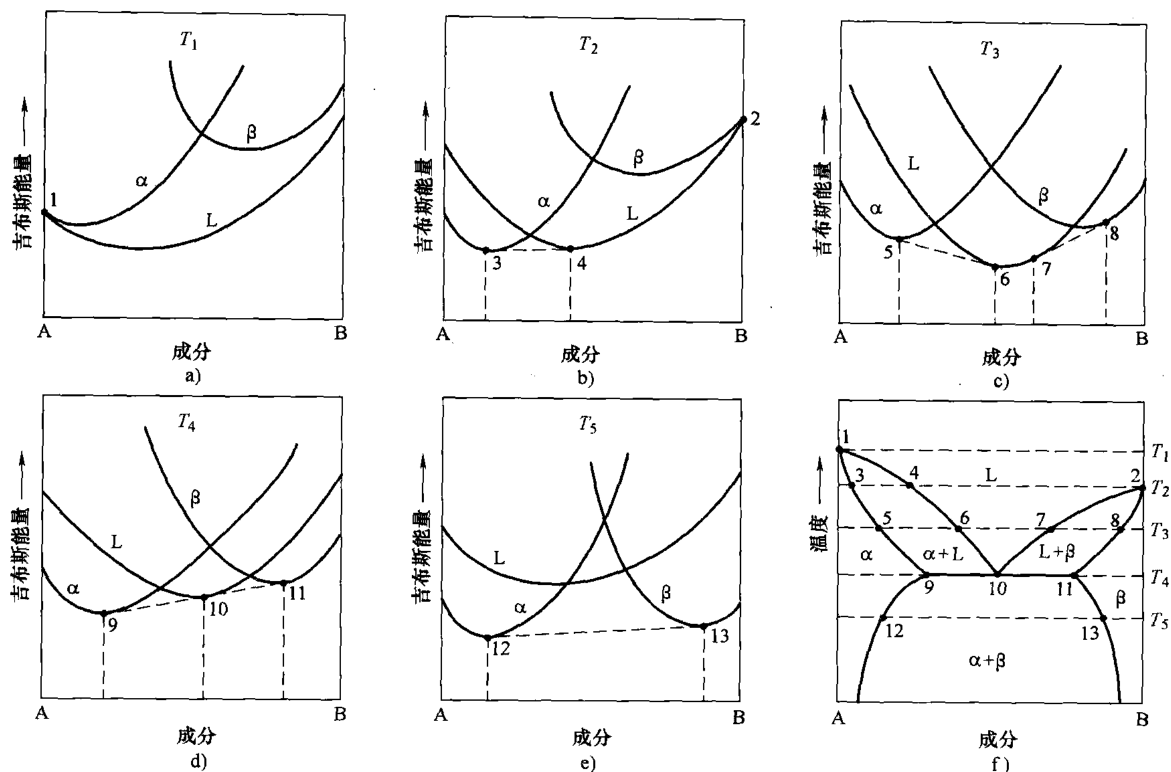


图 1.2-27 利用吉布斯能量绘制共晶型的二元相图。摘自参考文献[3]

熵、密度等性质各异的相与相间的转变。在成分、焓、熵、克分子体积方面，没有断续性的转变称为较高阶的转变(*higher-order transition*)，这种转变倒也不经常发生。当温度升高到771℃(1420℉)以上时，铁的磁性特性从铁磁性转变为顺磁性就是一个二阶转变的例子：这里没有发生相变，而且吉布斯相法则也不在其转变中起作用。

另一个具有较高阶转变的例子就是作为一种多组分晶体结构(无序结构，*disordered structure*)的不同种类原子从随机排列到按照某种程度的原子晶体顺序(*crystal ordering*)(顺序结构或超晶格，*ordered structure* 或 *superlattice*)而排列的连续改变，或者其逆反应。

相图的解读

成分刻度。由科学家使用的相图通常是按照原子百分比(或分子比值)作为坐标刻度，而由工程师使用的相图通常是按照质量分数作为坐标刻度。可以利用表 1.2-7 中给出的方程式进行质量分数和原子百分比之间的转换，而标准相对原子质量可以在元素周期表(见图 1.2-1)里查到。

表 1.2-7 成分换算

可以用下面的方程式二元系统的成分换算(式中：wt%，质量分数(重量百分比)；at%，原子百分比；at. wt，相对原子质量——译者注)：

$$\text{wt\% A} = \frac{\text{at. \% A} \times \text{A 的 at. wt}}{(\text{at. \% A} \times \text{A 的 at. wt}) + (\text{at. \% B} \times \text{B 的 at. wt})} \times 100$$

$$\text{at. \% A} = \frac{\text{wt. \% A/A 的 at. wt}}{(\text{wt. \% A/A 的 at. wt}) + (\text{wt\% B/B 的 at. wt})} \times 100$$

更高阶系统的原子百分比和质量分数之间的换算方程式与二元系统里的相似，只是为增加的组分在分母中再添加一项。例如对于三元系统：

$$\text{wt\% A} = \frac{\text{at. \% A} \times \text{A 的 at. wt}}{(\text{at. \% A} \times \text{A 的 at. wt}) + (\text{at. \% B} \times \text{B 的 at. wt}) + (\text{at. \% C} \times \text{C 的 at. wt})} \times 100$$

$$\text{at. \% A} = \frac{\text{wt. \% A/A 的 at. wt}}{(\text{wt. \% A/A 的 at. wt}) + (\text{wt\% B/B 的 at. wt}) + (\text{wt\% C/C 的 at. wt})} \times 100$$

更高阶系统的原子百分比和质量分数之间的换算也可以很容易地通过计算机的数据表程序来完成。

线型和标记。相图中磁性转变(居里温度和尼尔温度)和不确定性或推测性的边界线一般在相图中表示成不同类型的非实线。

作为纯元素的金属类组分通常在相图中就以它们的符号识别。多晶型的同素异性体元素则用字头为小写的希腊字母来分辨。

用括号里的符号如(Cr)或(αTi)，命名相图中组分元素的同素异性体的终端固相。连续的固溶体则用其两种元素的名称如(Cu,Pd)或(βTi,βY)来命名。

相图中的居间相常用小写的希腊字母来标记。但是，有几个希腊字母常用于表示特定的相，特别是无序固溶体，如β表示无序体心立方晶体(bcc)，ζ为无序紧凑型六方晶体(cph)，γ为γ黄铜型结构，而σ为σCrFe型结构。

对于线性化合物，采用化学计量的相名而不是希腊字母来表示(例如用 A_2B_3 而不用δ表示)。希腊字母的字头则用于表示间化合物高温或低温的形式(例如,用 αA_2B_3 表示低温形式和 βA_2B_3 表示高温形式)。

杠杆规则。如同“热力学和相图”一节所解释的那样，在两相区中代表两个共存相的两点之间的连接线是一条假想水平线，而这两个共存相就是在该线所表示的温度下保持平衡。根据杠杆规则(*lever rule*)可以利用连接线确定处于平衡的相比值大小。杠杆规则就是物质守恒定律的数学表达式，借此可以由合金的整体成分和各共轭相的成分来计算相的大小。如图1.2-28a所示。

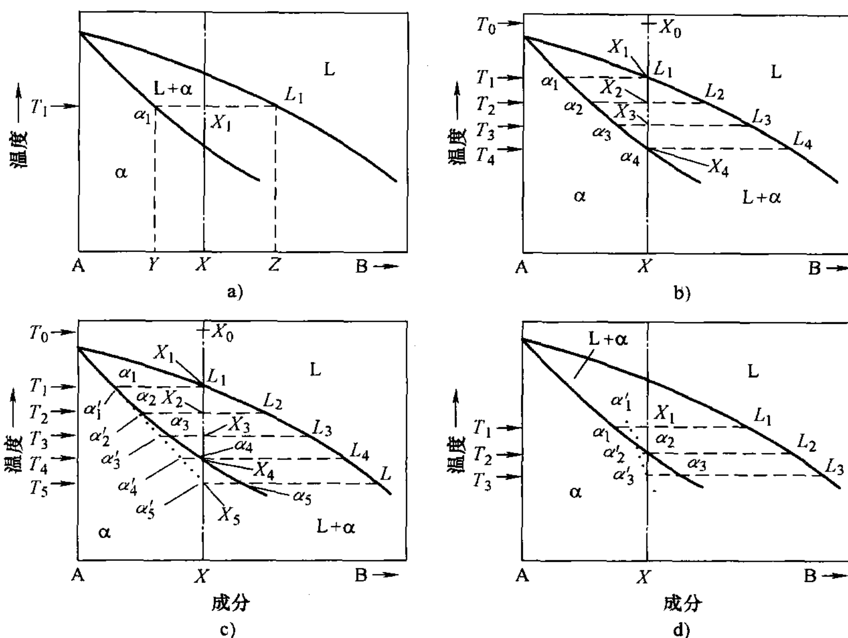


图1.2-28 包含两相(液相+固相)的局部二元相图。引自参考文献[1]

a) 杠杆规则的应用 b) 平衡凝结 c) 非平衡凝结 d) 均质化试件的加热

在 α_1 和 L_1 连线的左端，整体成分中组分B为 $Y\%$，则组分A为 $(100-Y)\%$，以此构成100%的α固溶体。随着组分B在整体成分中的含量向右移动，就会有一些液体伴随着固体出现。合金中B的含量进一步增加，混合物中的液体也随之增加，直到连接线的右端，材料全部变为液体。在成分含量为 X 处(即小于含量一半的 L_1 点处)，固体的含量多于液体。利用杠杆规则，两种相的大小比值可以按下式进行计算:

$$液体(\%)=\frac{线\ \alpha_1X_1\ 的长度}{线\ \alpha_1L_1\ 的长度}\times100$$

$$固体(\%)=\frac{线\ X_1L_1\ 的长度}{线\ \alpha_1L_1\ 的长度}\times100$$

应该记住，相大小是按质量分数或原子百分比计算的(表1.2-8)，而不是按所观察到的相显微组织直接显示的面积或体积百分比。

相比例线。在解读许多三元相图的截面(或其他类型的截面)里的相之间的关系时，往往会因为存在着大量的线和面而感到困难。应用相比例线(*phase-fractionline*)可以将这个问题简化一些。为此，利用几组等相比例曲线(见图1.2-29b)代替等温截面里的几组常为不平行的连接线(见图1.2-29a)。注意呈现为三角形网络的相比例线延伸通过的三相域区。作为连接线，相比例线的数目根据所用的相图不一而定。对于简单的相图，这种方法看似帮助不大，但在较复

表1.2-8　体积系数

为了将从合金试件的相图中求得的重量比值，与它在显微组织中观测到的二维图像关联起来，有必要在质量比值和面积比值之间按照十进制小数进行转换。这种转换可以按以下方式推导：

利用杠杆规则从相图中求得的相的质量比值：

$$相的体积部分=\frac{相的质量比值}{相密度}$$

全部所展示相的总体积＝各相的部分体积的总和。

$$相的体积比值=\frac{相的质量比值}{相密度\times总体积}$$

按照体视学和定量金相方法可以得出面积比值等于体积比值(参考文献[6])(相的面积比值等于试件视场上所观测到的显微横截相的面积之和除以视场的总面积)。所以：

$$相的面积比值=\frac{相的质量比值}{相密度\times总体积}$$

上面方程式中的相密度值可以通过测量或计算得到。化学元素和某些线性化合物的密度可以从有关文献中查到。此外，由一种或多种元素构成的相单元晶体的密度，可以利用有关其晶体结构的数据以及构成其元素的原子量计算得到，如下所示：

$$每种元素的重量=原子数量\times\frac{原子质量}{\text{Avagadro 常数}}$$

总单元晶体重量＝每一种元素的重量之和

密度＝总单元晶体重量/单元晶体的体积

举例，纯铜的密度计算如下，它有 fcc 的晶体结构和0.36146的晶格参数：

$$\rho=\frac{4\ 原子数/单元晶体\times63.564\text{g/mol}}{6.0227\times10^{23}原子数/\text{mol}\times(0.36146\times10^{-9}\text{m})^3}=8.937\text{mg/m}^3$$

以上数值与文献公布的数值8.93相符。

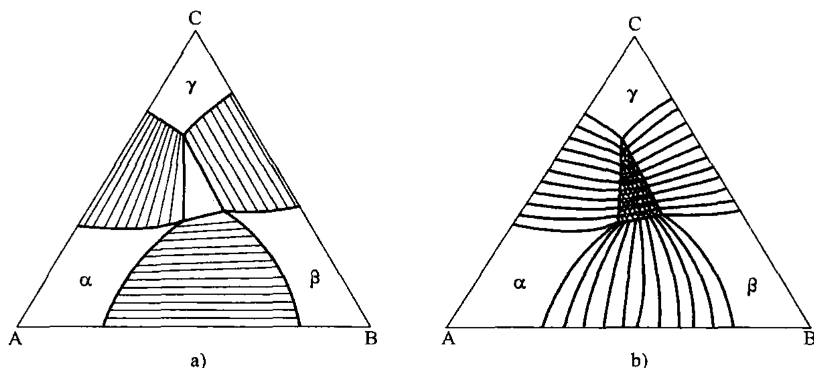


图1.2-29　二者可取其一的系统，显示不同的三元相图的等温截面上的多相域内的相之间关系。引自参考文献[4]

a) 连接线　b) 相比例线

杂的系统里它是很有用的。更详细的内容可参阅参考文献[4]和[5]。

固化。可以利用连接线和杠杆规则解释固溶合金的凝固。考虑在不同温度的一系列连接线如图1.2-28b所示，所有这些线都相交于整体成分 X 处。首先凝固的晶体成分为 α_1。固态晶体随着温度降至 T_2 而生长，从液体中析出的A原子多于B原子，于是留下液体的成分就转变为 L_2。因此在凝固过程中，凝固在晶体上的固体层和留下的液体的两种成分都连续地向组分B含量增加而组分A含量减少的方向转变。而且，为保持平衡，固相晶体必须从液体中吸取B原子，进而使B原子从原先已凝结的材料中迁移(扩散)到随后形成的析出层中。在这个变化过程中，固体材料的平均成分沿着固相线到达 T_4，而等于合金的整体成分。

成核。如果为了维持平衡而冷却得太快，在晶体上逐渐生成的析出层则有一个从中心到边缘的局部成

分变化范围（即所谓成核，*coring*）。图 1.2-28c 所示为其状态的形成，并没有 B 原子从在温度 T_1 里固化的材料扩散到在温度 T_2 里凝固的材料中去，只有到那一点温度后所形成固体的平均成分，才会沿固相线而变化。它将不会留在固相线的左边，而是沿成分从 α_1' 到 α_3'。注意只有到了温度 T_5 之后才会发生最后凝固，这就意味着非平衡凝固的发生比平衡凝固有着更大的温度范围。因为大部分的金属都是通过“树枝状”晶体（也称枝晶体，*dendrites*）的形成和生长而凝固的，所以成核有时就称之为枝晶体偏析（*dendritic segregation*）。图 1.2-30 所示就是枝晶体成核的例子。



图 1.2-30　铜合金 71500（Cu-30Ni）铸块。枝晶体显示有成核；亮处为富镍区，暗处为贫镍区，20×。引自参考文献[6]

熔析。由于具有成核显微组织的最低凝固材料在固化晶体的边缘（晶粒边界）上熔析出来，故当该合金试样被加热至达到平衡的固相线以下的温度时，这种材料就会被再熔化。如果在试件正承受应力（如正进行压力加工）时，发生晶界的熔化（也称“熔析”，*liquation*，或燃烧），那么发生液化的晶界将崩溃，试样也就丧失了塑性，即表现为热脆性（*hot short*）。

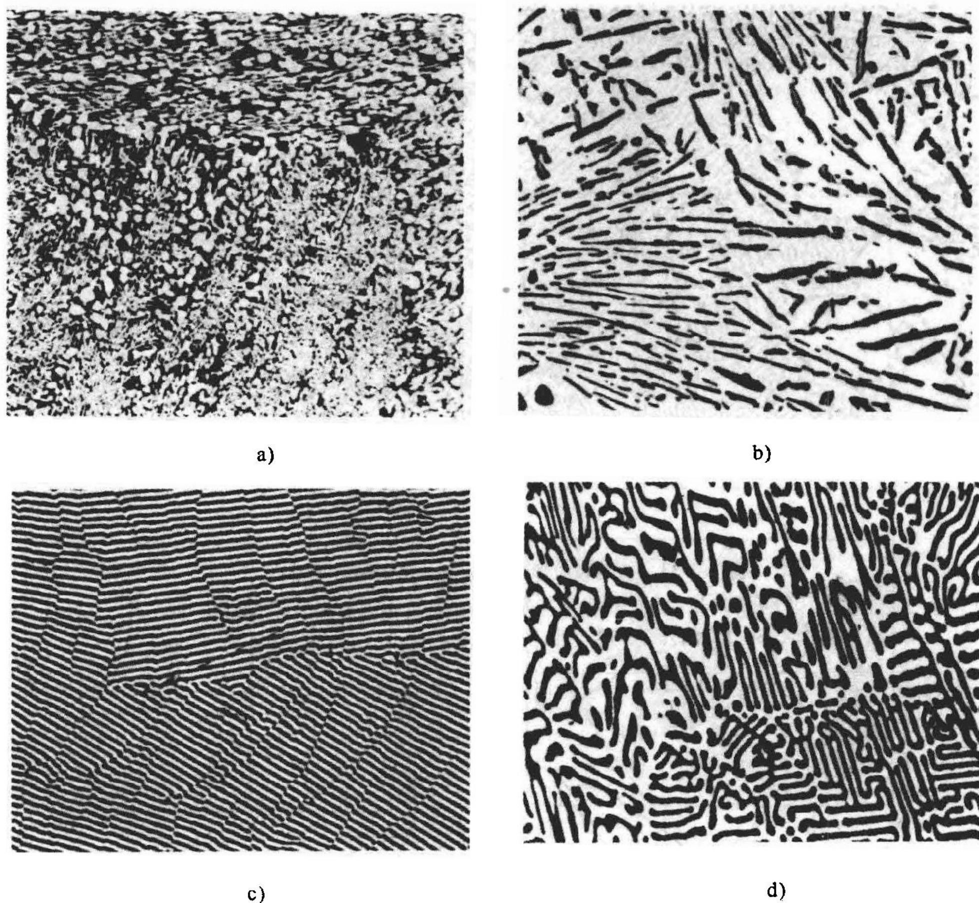
熔析还有当温度回到室温之后，使试件力学性能（显微组织）劣化的作用，如图 1.2-28d 所示。如果均质合金 X 因某种原因（无意中的或在焊接过程中的等）被加热到液相加固相的区域，那么当其达到 T_2 的温度时就开始熔化，此时首先形成的液体具有 L_2 成分。将样品以正常的速度加热到温度 T_1，至此所形成的液体成分为 L_1，但是其固体却没有时间达到平衡成分 α_1。其平均成分将处于某一中间值，如为 α'_1。按照杠杆规则，这意味着在该温度下将生成少于平衡所需的液体量。如果样品随后再从温度 T_1 快速冷却，那么将以正常方式发生凝固，材料以成分 α_1 层状地析出在已有的固体晶粒上。此后，析出层中的 B 含量随温度到达 T_3 时而逐渐增加到 α_3，此时全部的液体都转化为固体。这也使得原先的熔化区沿晶界发生成核，有时甚至发生在使样品的强度降低的孔穴里。均质化热处理可以消除成核过程，但不能免除孔穴的生成。

共晶体显微组织。当共晶成分的合金从液态冷却到共晶温度，就会发生共晶反应，于是两条不同的液相曲线在此相交。在该温度下，α 和 β 两种固相都必须析出在晶核上，直到全部液体都转变为固体为止。这种同步析出结果所形成的显微组织就是一种相的不同形状颗粒生成在另一种相的基体上，或者是由两种相层交替而构成的显微组织。作为特征性的共晶显微组织的例子包括球状或团状、针状或杆状，以及层状（或片状、中国书法或金银丝状）。每一种共晶合金在缓慢冷却时，都有其自己的特征性显微组织（见图 1.2-31）。然而更快的冷却会影响所形成的显微组织（见图 1.2-32）。鉴别共晶组织必须小心，因为从横截面上看，长形的颗粒会被看成是球状的，而扁平状的会被看成是长形或针形的。

如果合金具有与共晶成分所不同的成分时，合金将在共晶温度达到之前就开始固化。如果合金是亚共晶的，那么在剩下液体中，在共晶温度的固化发生之前，某些 α 枝晶将变成液体。如果合金是过共晶的，则首先（原始的）固化的材料将是 β 枝晶。亚共晶合金和过共晶合金通过缓慢冷却的显微组织，将由初始组分（*primary constituent*）中相对较大的颗粒所构成，并包括一开始凝固就被相对较细的共晶组织所包围的一种相。在很多情况下，可以从颗粒的形状看出它们与枝晶源头之间的关系（见图 1.2-33a）。在另一些情况里，起始的枝晶几乎完全成为自形的颗粒（即颗粒具有它们自己的特征形状），由此反映了相的晶体结构（见图 1.2-33b）。

如前所述，因为没有足够的时间达到平衡状态的冷却速度，将会影响所形成的显微组织。例如，作为共晶系统的一种合金，有可能会在其成分超过这种共晶组织的正常范围的合金中形成某种共晶组织。这可以用图 1.2-34 予以说明。以相对较快的速度而冷却的合金 X，其固体材料成分将沿着 α_1—α'_4 线而不是到达 α_4 的固相线而生成的。于是，最后固化的液体将具有 L_4 而不是 L_3 的共晶成分，并且在其显微组织中生成某种共晶组织。当温度达到 T_5 时产生的问题，将留在以后讨论。

共析合金的显微组织。因为原子在固体中的扩散速度远远低于在液体中的扩散速度，所以在固体/固体之间反应的非平衡转变（即所谓共析反应）要比液体/固体之间的反应（即所谓的共晶反应）重要得多。



a) b)

c) d)

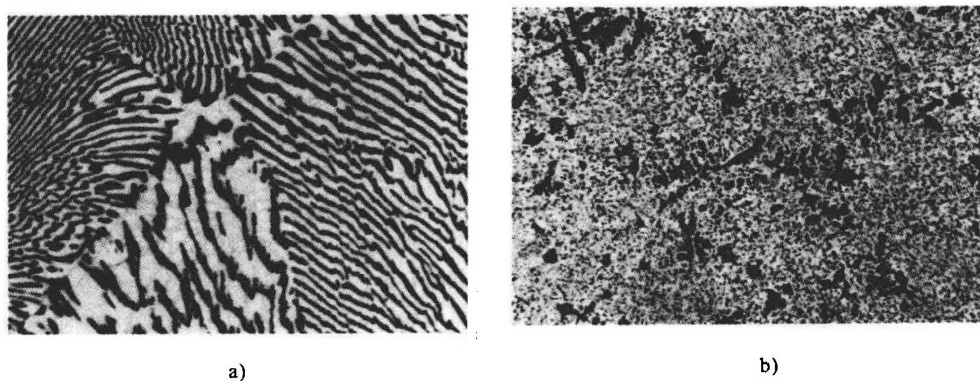
图 1.2-31 缓慢冷却的特征性共晶显微组织举例。引自参考文献[6]

a）40Sn-50In 合金，在富铟金属间化合物相的基体（暗）中有球状的富锡金属间化合物相（亮），150 ×

b）Al-13Si 合金，由铝基体中短而带尖角的硅（暗）所构成的针尖状组织，200 ×

c）Al-33Cu 合金，由暗色、层状 $CuAl_2$ 和亮色、层状的铝固溶体所构成的片状组织，180 ×

d）Mg-37Sn 合金，由镁固溶体的基体中丝状的 Mg_2Sn（暗）所构成片状组织，250 ×



a) b)

图 1.2-32 冷却率对 Sn-37Pb 合金（共晶软焊剂）的影响。引自参考文献[6]

a）缓慢冷却的试件，由暗片状的富铅固溶体和亮片状的锡所构成的片状组织：375 ×

b）更快冷却的试件，在锡的基体中的球状富铅固溶体，其中一些呈亮枝晶组织：375 ×

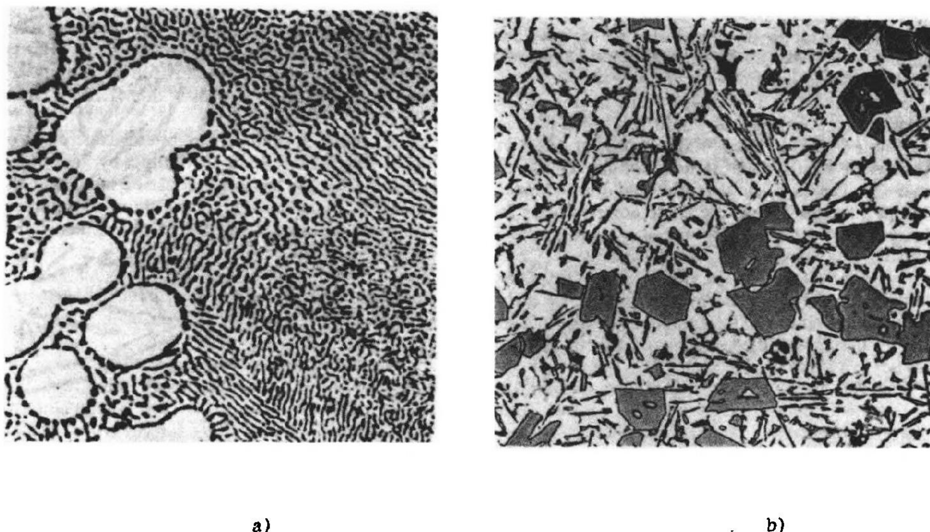


图 1.2-33 初始颗粒形状的例子。引自参考文献[6]
a) Sn-30Pb 亚共晶合金，在锡铅共晶基体中的富锡固溶体的枝晶颗粒，500×
b) Al-19Si 过共晶合金，磷改性，在铝硅共晶基体中的硅自形颗粒，100×

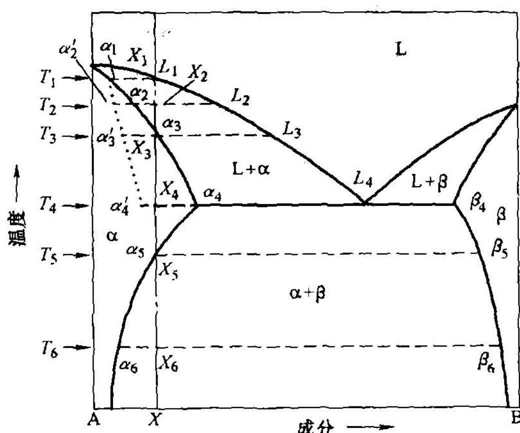


图 1.2-34 二元相图，图示为冷却速率对处于平衡共晶转变线之外的合金的影响。快速凝固到终相域会造成某种共晶组织的生成，在单相域温度下的均质化将会消除共晶组织，β 相将因缓慢冷却而从互溶体中析出，并进入 α + β 区。摘自参考文献[1]

通过共析温度的缓慢冷却，大部分共析成分的合金如图 1.2-35 中的合金 2 从单相显微组织转变为成团(或晶团)的 α 和 β 片状交替排列的层状结构。这种组织看上去与层状的共晶组织非常相像(见图 1.2-36)。在铸铁和铸钢中看到的这种组织称之为珠光体。因为在显微镜下(特别是在斜射光下)，看上去就像闪亮的珍珠母，如在非铁合金中发现类似的共析组织，则常把它叫做“类珠光体”或“珠光体似的”。

术语亚共析和过共析有与共晶系统里的亚共晶和

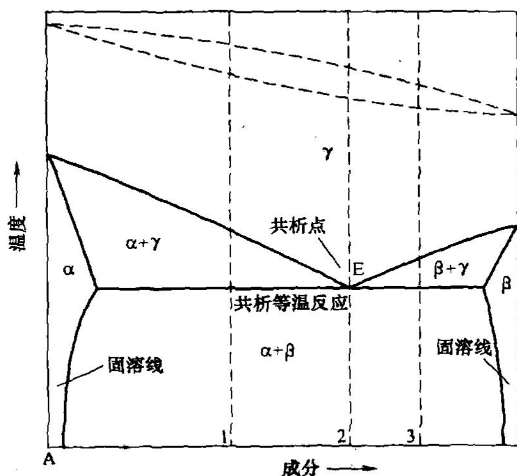


图 1.2-35 共析系统的二元相图。摘自参考文献[1]

过共晶(hypoeutectoid 和 hypereutectoid)相类似的共析成分关系，在图 1.2-35 中的合金 1 是亚共析合金，而合金 3 则是过共析合金。这种合金的固态转变是分两步进行的；除了微观组分以外，非常像亚共晶和过共晶合金的凝固，其微观组分是在达到共析温度之前就形成的，故被称为前共析组分(*proeutectoid constituents*)，而不是“初生的”。

其他无变度反应的显微组织。可以按照在共晶和共析反应中所讨论的类似方式使用相图，以此确定所希望得到的显微组织，通过表 1.2-6 所列的其他六种反应中的任意一种使合金冷却，由此得到预期结果。

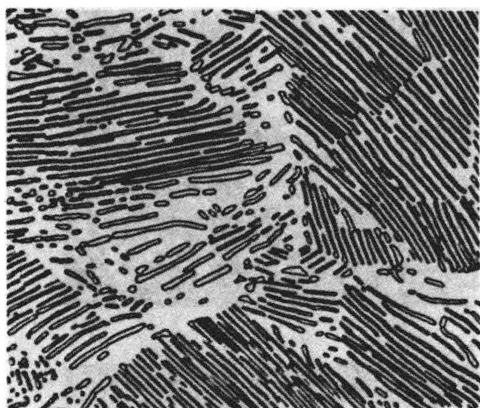


图 1.2-36　Fe-0.8C 合金，图示亮的铁素体和暗的渗碳体呈交错层状的一种典型的珠光共析组织，500×。引自参考文献[6]

固态析出。如果图 1.2-34 中的合金 X 是在温度 T_3 和 T_5 之间被均质化，那么它将达到其平衡状态；也就是，共晶组分中的 β 部分将被溶解掉，并且将由 α 晶粒单独构成其显微组织。在温度 T_5 以下冷却的这种显微组织不再代表平衡状态，取而代之的是，它将成为 B 原子的过饱和组织。为使试件恢复到平衡状态，其中一些 B 原子将趋于在试件的不同区域聚集，而形成新 β 材质的晶团。在这些晶团中，一部分被称为 G-P（铝-铜合金时效组织）区（*Guinier-Preston zones*）里的 B 原子将发生漂移，而其他晶团得到充分的生长，并足以形成一种初生但又别无二致的颗粒。α 相和 β 相两者在晶体结构和晶格参数方面的差异，导致这两种材料间的晶界上的晶格应变，从而提高了样件的总体能量水平，并使之硬化和强化。在此阶段很难从显微组织中分辨这些初生颗粒，而通常只是一般性的暗黑色组织。如经过的时间足够长，β 相域将从它们的 α 主晶粒上剥落下来，并作为特异的颗粒析出，于是消除晶格应变而使硬度和强度回到原来的水平上。当以上述过程来说明一种简单的共晶系统时，相图上任何存在相似条件的地方都会发生这个过程；即，在从单固相区域冷却转变到包含第二种固相区域的系统中存在着一个合金成分的范围，而且这两个区域间的边界通过不断冷却而从其成分线倾斜出去。图 1.2-37 所示就是几个这样系统的例子。

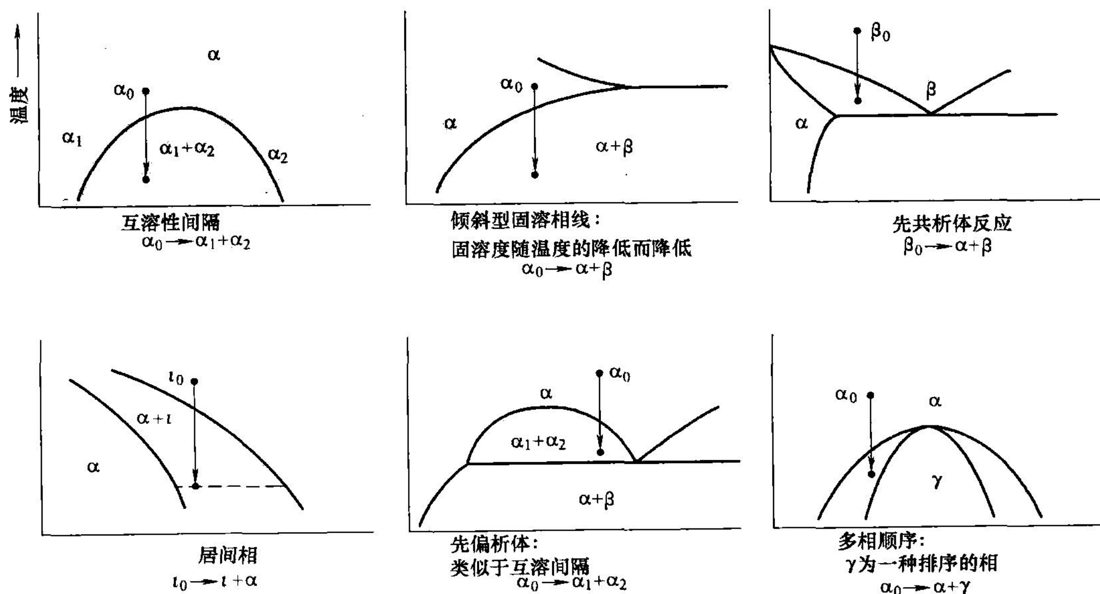
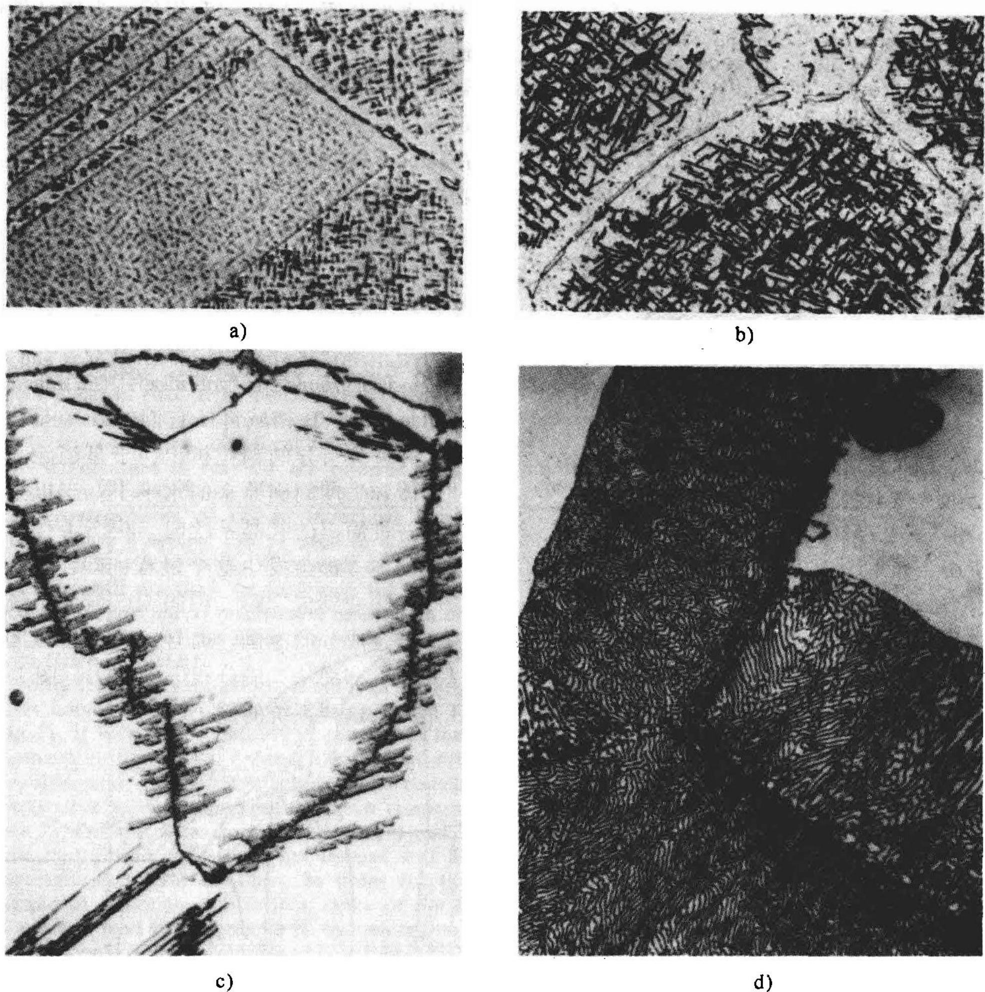


图 1.2-37　发生沉淀反应的二元相图的几个例子。引自参考文献[6]

虽然其整个过程都称为析出硬化（*precipitation hardening*），但是该术语通常只是指在真正大量发生析出以前所析出的那部分。因为该过程只有一会儿就完成了，故常以时效硬化（*age hardening*）一词代之。进行时效的速率则取决于过饱和的程度（即离平衡状态还有多远）、开始产生晶格应变的数量（失调晶格的数量）、剩下尚待消除应变的所占比例（其过程还要进行多久）以及时效的温度（原子迁移的活性）。β 析出物一般是以小自形颗粒的形式存在于晶粒的边界和 α 相晶粒的内部。在大部分情况里，颗粒的大小差不多一致并按系统性的方式取其方向。作为析出显微组织的若干例子如图 1.2-38 所示。



a) b) c) d)

图1.2-38 特征性沉淀的显微组织的例子。引自参考文献[6]

a）在温度为800℃（1470℉）和时效期为3×10^3min的Co-12Fe-6Ti合金中的CoTi（γ相）的一般性和边界沉淀，1260×

b）在温度为375℃（710℉）和时效期为90h的一般性沉淀（晶体内魏氏组织），Al-18Ag合金里局部晶界沉淀，但晶界附近有明显的无沉淀区，500×

c）沉淀主要或局部地位于沿Ni-20Cr-1Al合金的晶界处，500×

d）在温度为600℃（1110℉）和时效期为6min的网格状或局部的沉淀，并沿Fe-24.8Zn合金晶界均匀地增长，1000×

相图举例

在前面的章节，已经讨论了解读相图的一般原理。现将这些原理应用于以下合金系统的实际相图里。

铜-锌系统。黄铜合金的冶金性质长期以来极具市场潜力。最普通的可锻性黄铜有五种铜和锌的含量（见右表）。

UNS代号	普通名称	w(Zn)(%)	
		名义	范围
C23000	红黄铜，85%	15	14.0~16.0
C24000	低黄铜，80%	20	18.5~21.5
C26000	弹壳黄铜，70%	30	28.5~31.5
C27000	黄铜，65%	35	32.5~37.0
C28000	孟兹合金，60%	40	37.0~41.0

如图1.2-39所示，这些合金包括一个很大范围的铜-锌相图。在高铜端的合金（红黄铜、低黄铜和弹壳黄铜）处于铜的固溶相相域，按照旧的命名法将这个相域称为α黄铜。正如所希望的，这些黄铜的显微

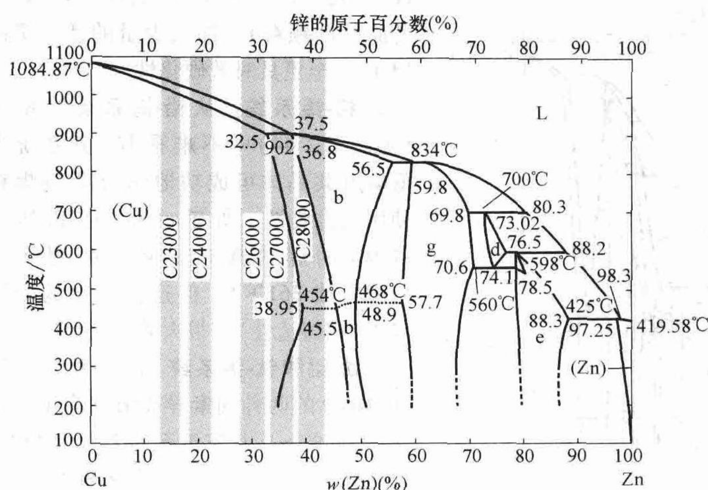


图1.2-39 铜-锌相图，五种普通黄铜的成分范围。摘自参考文献[7]

组织都是单由铜固溶体晶粒所构成的(见图1.2-40a)。然而铜晶体的应变是由于锌原子的存在而引起的，并且在合金中产生固溶硬化。结果，在加工硬化和退火状态下，黄铜的强度随着含锌量的增加而提高。

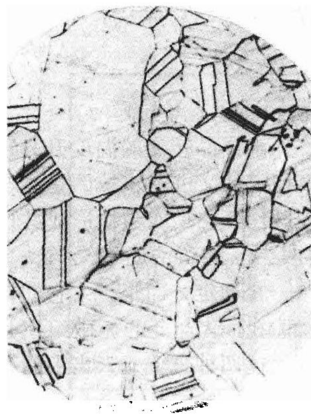
然而对于含锌量较高的那些黄铜(黄铜和孟兹合金)，其成分处于(Cu)加β的两个相域相叠加的范围里。因此，这些所谓的α-β合金的显微组织显示出不同量的β相(见图1.2-40b和c)，而且它们的强度也超过了α黄铜，并获得进一步的增强。

铝-铜合金系统。铝-铜合金是另一种在工业上非常重要的合金系统。尽管这种系统的相图是相当复杂(见图1.2-41)，但对该合金的讨论仅限于相图上铝的一侧，即在铝的固溶体和θ(Al_2-Cu)相之间形成一种简单的共晶体。而该合金家族(命名为2*xxx*系列)的铜名义上的含量(质量分数)范围为2.3%~6.3%，使之成为亚共晶合金。

相图上这个区域的关键特征是铝溶解线的形状。在共晶温度[548.2℃(1018.8℉)]下将有5.65%(质量分数)的铜溶解于铝。然而，处于平衡状态留在铝固溶体里的含铜量在较低的温度下会急剧减少，到室温时只有不到1%。这是溶解线在析出硬化时的典型形状；如果其中任何一种合金在固溶相相域或其附近的温度中被均质化，那么它们的强度就能通过在相当低温度下的时效得到提高。

铝-镁系统。正如图1.2-42所示，铝-镁系统两端都有如图1.2-41所示的溶解线形状。因此铝-镁合金和镁-铝合金都可以进行时效硬化，而且在市场上都很重要。

铝-硅系统。非铁合金都不需要时效硬化来满足市场需求。例如，铝-硅系统(见图1.2-43)，硅几乎完全不能溶解于固体铝里。因此，在熔化时，加入过磷的铸造过共晶铝合金395(Al-19%Si)，会在其铝-硅共晶基体中含有较大的硅颗粒(见图1.2-33)。铝-硅合金具有很好的铸造性(硅可以改善铸造性和流动


a)


b)

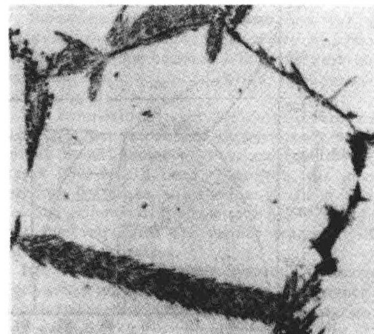

c)

图1.2-40 两种普通黄铜的显微组织。引自参考文献[6]

a) C26000(弹壳黄铜,70Cu-30Zn)，热轧、退火、冷轧并于638℃(1180℉)温度退火，图示为铜的固溶体的等轴晶体。(其中一些形成双晶)。75× b) C28000(孟兹合金,60Cu-40Zn)铸件，在β相的基体中的铜固溶体枝晶体。200× c) C28000(孟兹合金)在全部β组织的淬火过程中在β晶粒的晶界上所形成的铜固溶体的羽毛状组织。100×

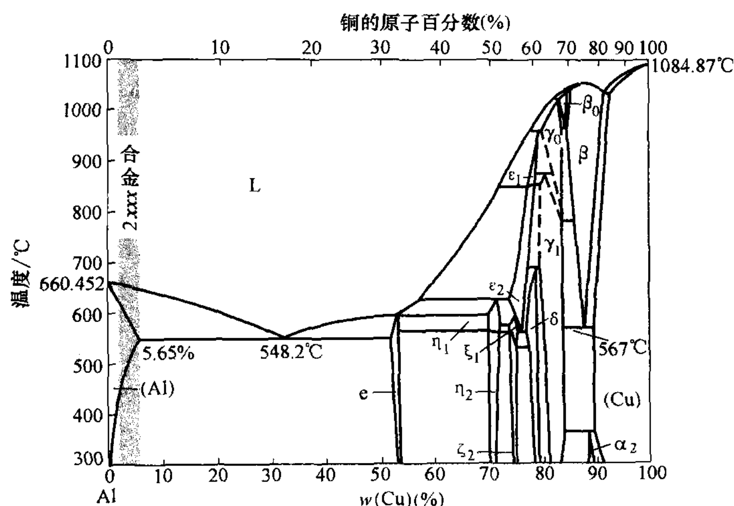


图 1.2-41 铝-铜相图，图示为作为沉淀硬化 2xxx 系列的成分范围。引自参考文献[7]

性)以及良好的耐腐、抗磨性(由于其硬的原始硅颗粒)。加入少量的镁，使得铝-硅合金更具时效硬化性。

铅-锡系统。从铅-锡系统的相图(见图 1.2-44)中不难看出，其系统中低熔点共晶体可成功地作为铅-锡焊料使用的重要性。所有 $w(Sn)$ 为 18.3%~61.9% 的焊料都有相同的凝固温度(183℃或 361℉)，但这些合金的凝固温度(和铸造性)有很大的变化范围。

钛-铝和钛-钒系统。钛系相图是以其固体钛的两种同素异晶形式为主要特征：cph 的 αTi 从室温至 882℃(1620℉)都是稳定的，bcc 的 βTi 则从 882℃ 直到熔化温度也都是稳定的。市场上用于钛合金的大部分合金元素可以分为 α 稳定剂(如铝)和 β 稳定剂(如钒和铬)，这取决于合金元素的加入是使同素异晶转变的温度升高还是降低(见图 1.2-45)。β 稳定剂又进一步按照是能与 βTi 完全混溶(如钒、钼、钽和铌)还是能与钛形成共析系统(如铬和铁)的分为两类。锡和锆还常能与钛形成合金，但不是为了使某一相稳定，而是扩大它们在 αTi 和 βTi 里的溶解度。市场上钛合金的显微组织是很复杂的，其中大多含有上述四种合金元素当中的一种以上。

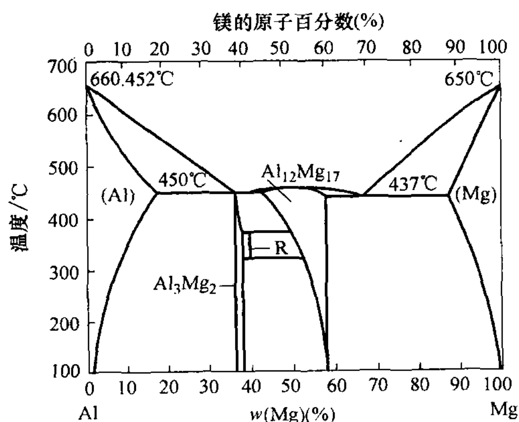


图 1.2-42 铝-镁相图。引自参考文献[7]

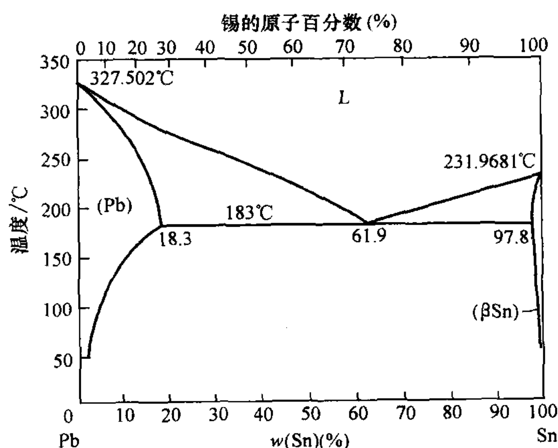


图 1.2-44 铅-锡相图。引自参考文献[7]

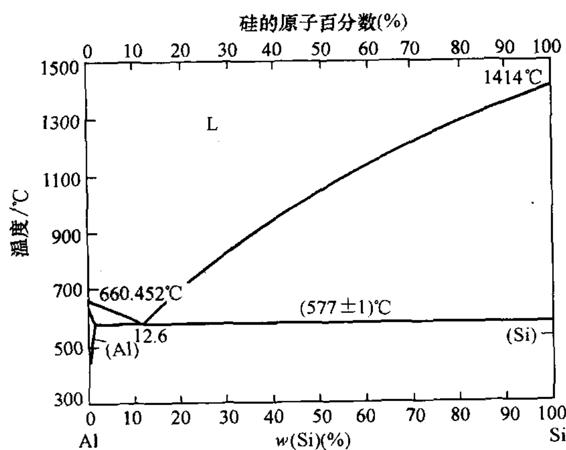


图 1.2-43 铝-硅相图。引自参考文献[7]

铁-碳系统。铁-碳相图显示铁与石墨形态碳间的稳定状态(见图 1.2-46)。但是要注意它有三种固体铁的形态，即：低温相 α、中温相 γ 和高温相 δ。此外，铁素体铁还要在 771℃(1420℉)的温度里经受一种在低温的铁磁状态和高温的顺磁状态之间的磁相转变。bcc Fe 的普通名称叫铁素体(取之拉丁文 ferrum,意

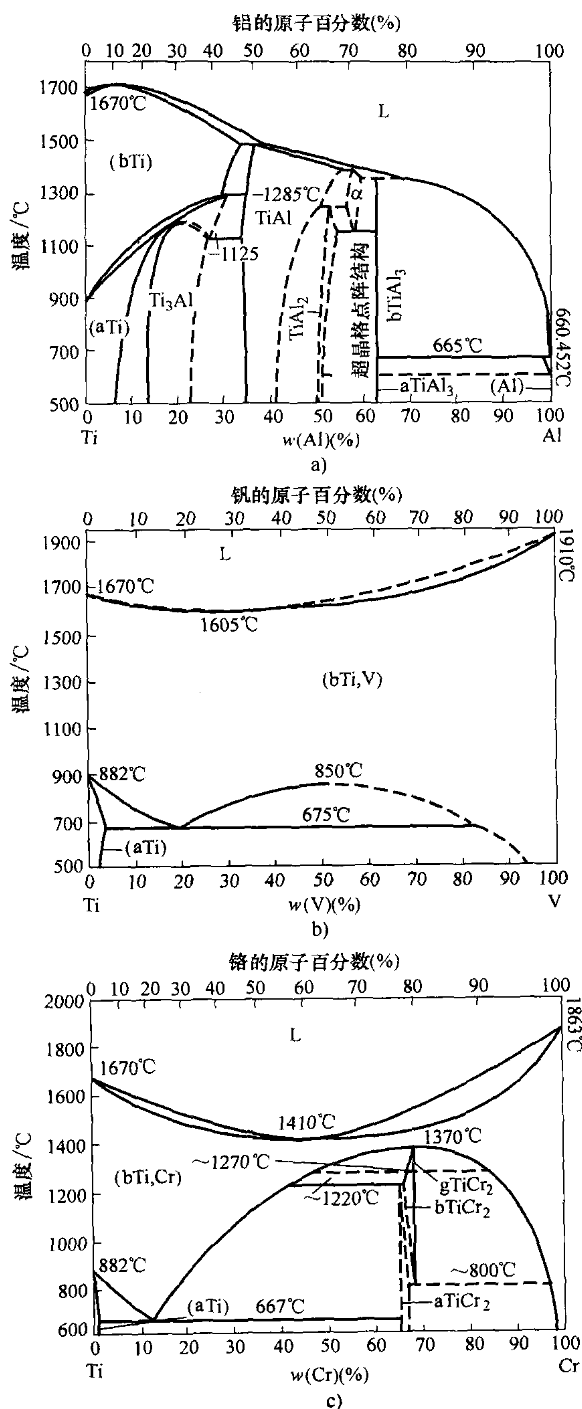


图 1.2-45　三种典型的二元钛相图，引自参考文献[7]

a）稳定化α(Ti-Al)　b）稳定化β，完全可溶性(Ti-V)　c）稳定化β，共析反应(Ti-Cr)

思为铁)，fcc 的γ相称之为奥氏体，得名于威廉·罗伯特·奥斯顿(William Robert-Austen)，bcc Fe 通常也叫铁素体，因为(除在其温度范围之外)它和α-Fe是一样的。铁-碳相图的主要特点是同时存在着共晶

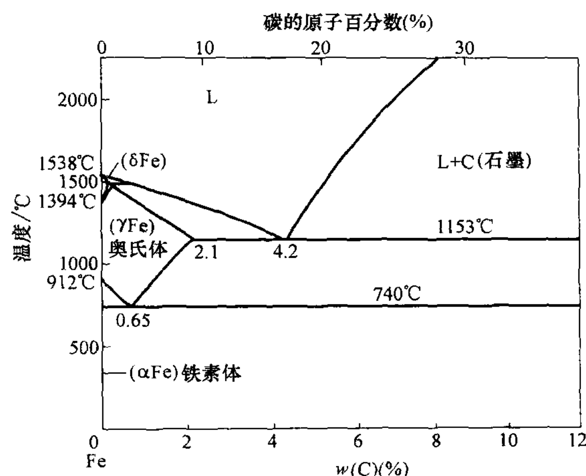


图 1.2-46　铁-碳相图。引自参考文献[7]

和共析两种反应，而且碳在铁素体和奥氏体两者中的固体溶解度有很大的差别。正是这些特点使得铁碳合金能通过适当的热处理，而在其显微组织和力学性能方面产生很大的变化。

铁-渗碳体系统。在钢的固化过程中，并不存在平衡状态。而是，任何不溶于铁里的碳都与具有亚稳定性的金属间化合物 Fe_3C(因为其硬度固也叫渗碳体)密切相关，而不是与留下来的游离形石墨的形式密切相关(见图 1.2-47)。因此，对于工业冶金行业来说，重要的是铁-渗碳体相图而不是铁-碳相图。然而应该记住的是渗碳体作为特别经久的相，只要经历足够长的时间或者有催化剂的存在，它还是会破碎为铁和碳。在铸铁中，硅就是使游离碳(片、针状的)呈现在显微组织中的催化剂(见图 1.2-48)。

在铁-碳和铁-渗碳体相图中的边界线，由于对于钢和铸铁的热处理十分重要，因而被特别命名，这些名称对于描述热处理非常有用。这些线在加热或冷却过程中代表着因固态反应而发生的热量吸收，*arrêt*(法文,吸收的意思)用字母“A”表示。这些表示方法如图 1.2-47 所示。为了进一步区分这些线，还加上“e”标明那些发生在平衡状态下的变化(用 Ae_1、Ae_3、Ae_4 和 Ae_{cm})。还有，因为在加热或冷却中，发生实际变化的温度相对其平衡值会有些漂移，当要指明因加热而引起略有升高的温度变化时，就用“c”(取之法文:*chauffage*,意思为加热)代替“e”。同样的，当要指明因冷却而引起略有降低的温度变化时，就用“r”(取之法文:*refroidissement*,意思为冷却)代替“e”。这些命名术语的使用都非常方便；因为它们不仅应用于铁和碳的二元合金，还可以在工业上用于钢和铸铁，而不管里面是否还存在其他元素。然而，像镁、铬、镍和钼的一些合金元素也确实会影

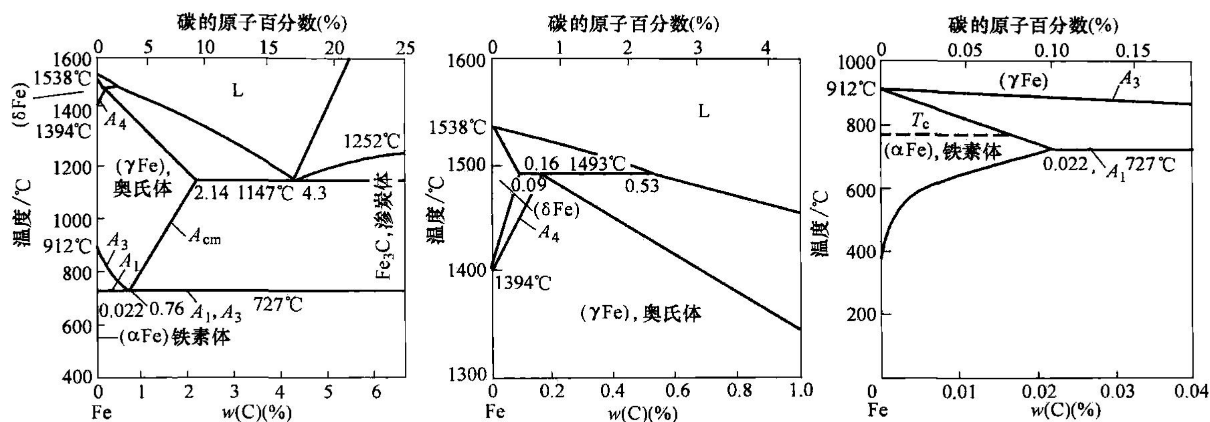


图 1.2-47 铁-渗碳体相图以及(γFe)和(αFe)相域的详图。引自参考文献[7]

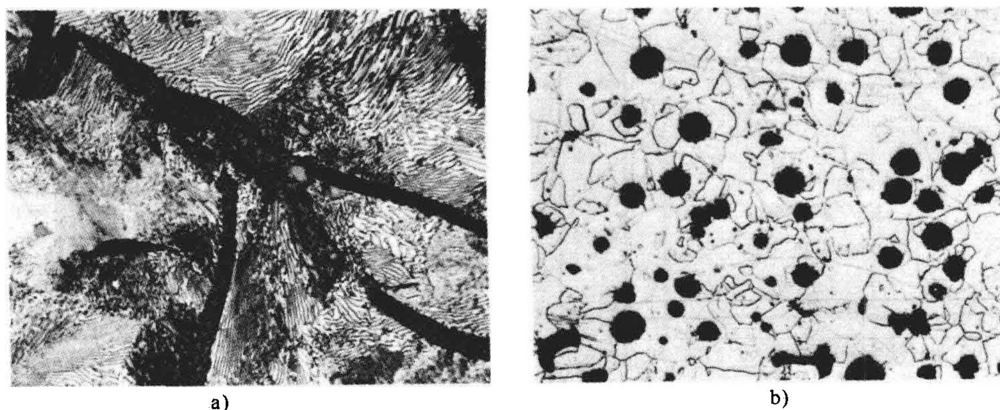


图 1.2-48 两种铸铁的显微组织。引自参考文献[7]

a) 30 号灰铸铁，图示为在珠光体的基体上 A 型石墨片。500 × b) 60-45-12 号的球墨铸铁，图示为在铁素体的基体上球形石墨(通过浇注时加入钙-硅间化合物而生产)。100 ×

响这些温度(主要是 A_3)。例如镍使 A_3 降低，而铬使其升高。

钢经过缓慢冷却得到的显微组织如下所述。当 w(C)为 0.007%~0.022% 时，由铁素体晶粒和从铁素体析出的渗碳体所构成的显微组织，往往因太细小而难以用光学显微镜观察到其构成(因为可能存在的某些其他金属原子会代替 Fe_3C 中的一些铁原子，为描述显微组织常用更为通用的术语“碳化物”代替渗碳体)。在亚共析范围(w(C)为 0.022%~0.76%)是由铁素体和珠光体晶粒组成显微组织。在过共析范围(w(C)为 0.76%~2.14%)可以观察到珠光体晶粒加上从奥氏体析出的碳化物。

通过缓慢冷却而成的亚共晶铸铁(w(C)为 2.14%~4.3%)，其显微组织是由枝状的珠光体晶粒(由亚共晶初始奥氏体转变而来)和由碳化物和变型奥氏体构成的铁-渗碳体共晶体晶粒(称为“莱氏体”，取名于阿道夫·莱迪勃，Adolf Ledebur)，再加上从奥氏体析出的碳化物以及游离碳颗粒所共同组成的。对于缓慢冷却的过共晶铸铁(w(C)为 4.3%~6.67%)，其显微组织显示为初始碳化物颗粒和游离碳，再加上变型的奥氏体晶粒。

当然，铸铁和铸钢在其铸造过程中并不是通过缓慢冷却得到的，而是从熔化状态以很快的速度冷却，然后再经过某种热处理得到的，对于可锻压的钢还要有某种热和/或冷变形加工。通过这些热处理可以得到差别很大的显微组分和显微组织，这些差别也远远超出稳定和亚稳定的平衡相图所能讨论的范围。然而在制定热处理工艺时，相图的作用不可估量。例如，正火通常是从高于其相变温度(亚共析合金的 A_3 和过共析合金的 A_{cm})的大约 55℃(100℉)通过空气冷却而完成的。而对于亚共析和过共析合金的完全退火，则都是从高于 A_3 的大约 28~42℃(50~75℉)的温度通过控制冷却来实现的。所

有的回火和工艺退火的操作都是在低于下相变温度(A_1)里进行的。而奥氏体化应该在 A_3 和 A_{cm} 以上的温度中进行，以确保全部转化为奥氏体，但是温度还要尽量低一些，以防止晶粒生长得太快。

Fe-Cr-Ni 系统。许多工业用的铸铁和铸钢都含有铁素体-稳定化元素(如硅、铬、钼和钒)和/或奥氏体稳定剂(如镁和镍)。二元铁-铬系统的相图就代表了一种具有铁素体稳定剂功能(见图 1.2-49a)。在刚刚低于固相线的温度下，bcc 铬会形成一种连续的 bcc(δ)铁素体固溶体。在更低的温度里，γ-Fe 相出现在相图中铁的一侧，并形成一个延伸到 w(Cr)约为 11.2% 的铬的“环路”。w(Cr)高达 11.2% 的铬及足量碳的合金可以通过在该环路里的温度淬火而被淬硬。

仍然在较低的温度下，bcc 固溶体是一种再次连续的 bcc 铁素体，但这时它含有 αFe。通过这种连续的 bcc 相域，可以确认 δ 铁素体与 α 铁素体是一样的。在 w(Cr)约超过 13% 且不含碳的 Fe-Cr 合金中，γFe 的不存在对于无论硬化或非硬化牌号的铁-铬不锈钢来说，都是一个重要的因素。还有，在这种低温下，已知的 σ 相的材料还会以 w(Cr)约为 14%~90% 之间的不同含量出现。σ 相是一种硬而脆的相，通常在工业用的不锈钢中应当予以避免。然而 α 的形成是取决于时间的，通常要求长时间处于较高温度中。

二元铁-镍系统代表具有奥氏体稳定剂的功能(见图 1.2-49b)。fcc 镍奥氏体形成一种含有 fcc(γ)的连续固溶体，后者使相图更具特色，但是 α 铁素体的相域延伸到了 w(Ni)约为 6% 的区域。从三元 Fe-Cr-Ni 系统的相图可看到，铁素体-稳定化铬的加入是如何影响铁-镍系统的(见图 1.2-50)。还能看到普遍使用的 w(Ni)约为 8% 的 18-8 不锈钢是一种在 900℃(1652℉)下的全奥氏体合金，尽管它还含有 w(Cr)约为 18% 的铬。

a)　　b)

图 1.2-49　两种有代表性的二元铁相合金图，引自参考文献[7]

a) 铁素体的稳定型(Fe-Cr)　b) 奥氏体的稳定型

Cr-Mo-Ni 系统。镍除了在合金、不锈钢和钴基及铜基合金中的应用之外，它还被作为一组合金的基础元素而使用。许多这种镍基合金中含有铬和钼(还有其他元素)，以提高其抗腐蚀和耐热性能。由于在大多数工业用 Cr-Mo-Ni 合金里钼的含量范围为 0~30%，图 1.2-51 所示的相图表明，在正常情况下它们的显微组织是以 γ 固溶体为基体而构成的，但是这种基体通常是通过如碳化物的第二相材料扩散而得到增强。例如，经析出的 fccγ′(Ni_3Al、Ti)可以提高其高温强度和抗蠕变性。

图 1.2-50　Fe-Cr-Ni 三元合金相图的 900℃(1652℉)等温截面，表示 18-8 的不锈钢名义成分。引自参考文献[8]

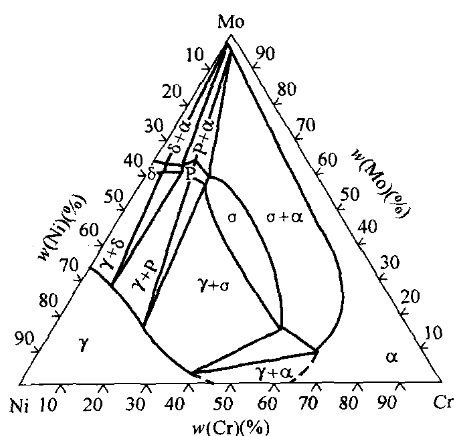


图 1.2-51 Cr-Mo-Ni 镍的三元合金相图的1250℃(2280℉)等温截面。引自参考文献[9]

参考文献

[1] F.N. Rhines, *Phase Diagrams in Metallurgy: Their Development and Application*, McGraw-Hill, 1956.
[2] A. Prince, *Alloy Phase Equilibria*, Elsevier, 1966.
[3] P. Gordon, *Principles of Phase Diagrams in Materials Systems*, McGraw-Hill, 1968; reprinted by Robert E. Krieger Publishing, 1983.
[4] J.E. Morral, Two-Dimensional Phase Fraction Charts, *Scr. Metall.*, Vol 18 (No. 4), 1984, p 407–410.
[5] J.E. Morral and H. Gupta, Phase Boundary, ZPF, and Topological Lines on Phase Diagrams, *Scr. Metall.*, Vol 25 (No. 6), 1991, p 1393–1396.
[6] *Metallography and Microstructures*, Vol 9, 9th ed., *ASM Handbook*, ASM International, 1985.
[7] T.B. Massalski, Ed., *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., ASM International, 1990.
[8] G.V. Raynor and V.G. Rivlin, *Phase Equilibria in Iron Ternary Alloys*, Vol 4, The Institute of Metals, 1988.
[9] K.P. Gupta, *Phase Diagrams of Ternary Nickel Alloys*, Indian Institute of Metals, Vol 1, 1990.

附录1 在大气压下的元素熔点与沸点

元素符号	熔点			沸点	
	℃	K	误差	℃	K
Ac	1051	1324	±50	3200	3473①
Ag	961.93	1235.08	—	2163	2436
Al	660.452	933.602	—	2520	2793
Am	1176	1449	—	—	—
Ar	-189.352 (T.P.)	83.798 (T.P.)	—	-185.9	87.3
As	614(S.P.)	887(S.P.)	—	—	—
At	(302)	(575)	—	—	—
Au	1064.43	1337.58	—	2857	3130
B	2092	2365	—	4002	4275
Ba	727	1000	±2	1898	2171
Be	1289	1562	±5	2472	2745
Bi	271.442	544.592	—	1564	1837
Bk	1050	1323	—	—	—
Br	-7.25 (T.P.)	265.90 (T.P.)	—	59.10	332.25
C	3827 (S.P.)	4100 (S.P.)	±50	—	—
Ca	842	1115	±2	1484	1757
Cd	321.108	594.258	—	767	1040
Ce	798	1071	±3	3426	3699

元素符号	熔点			沸点	
	℃	K	误差	℃	K
Cf	900	1173	—	—	—
Cl	-100.97 (T.P.)	172.18 (T.P.)	—	-34.05	239.10
Cm	1345	1618	—	—	—
Co	1495	1768	—	2928	3201
Cr	1863	2136	±20	2672	2945
Cs	28.39	301.54	±0.05	671	944
Cu	1084.87	1358.02	±0.04	2563	2836
Dy	1412	1685	—	2562	2835
Er	1529	1802	—	2863	3136
Es	860	1133	—	—	—
Eu	822	1095	—	1597	1870
F	-219.67 (T.P.)	53.48 (T.P.)	—	-188.20	84.95
Fe	1538	1811	—	2862	3135
Fm	(1527)	(1800)	—	—	—
Fr	(27)	(300)	—	—	—
Ga	29.7741 (T.P.)	302.9241 (T.P.)	±0.001	2205	2478
Gd	1313	1586	—	3266	3539
Ge	938.3	1211.5	—	2834	3107

（续）

元素符号	熔　点			沸　点	
	℃	K	误差	℃	K
H	-259.34 (T.P.)	13.81 (T.P.)	—	-252.882	20.268
He	-271.69 (T.P.)	1.46 (T.P.)	②	-268.935	4.215
Hf	2231	2504	±20	4603	4876
Hg	-38.836	234.210	—	356.623	629.773
Ho	1474	1747	—	2695	2968
I	113.6	386.8	—	185.25	458.40
In	156.634	429.784	—	2073	2346
Ir	2447	2720	—	4428	4701
K	63.71	336.86	±0.5	759	1032
Kr	-157.385	115.765	±0.001	-153.35	119.80
La	918	1191	—	3457	3730
Li	180.6	453.8	±0.5	1342	1615
Lr	(1627)	(1900)	—	—	—
Lu	1663	1936	—	3395	3668
Md	(827)	(1100)	—	—	—
Mg	650	923	±0.5	1090	1363
Mn	1246	1519	±5	2062	2335
Mo	2623	2896	—	4639	4912
N	-210.0042 (T.P.)	63.1458 (T.P.)	±0.0002	-195.80	77.35
Na	97.8	371.0	±0.1	883	1156
Nb	2469	2742	—	4744	5017
Nd	1021	1294	—	3068	3341
Ne	-248.587 (T.P.)	24.563 (T.P.)	±0.002	-246.054	27.006
Ni	1455	1728	—	2914	3187
No	(827)	(1100)	—	—	—
Np	639	912	±2	—	—
O	-218.789 (T.P.)	54.361 (T.P.)	—	-182.97	90.18
Os	3033	3306	±20	5012	5285
P(白)	44.14	317.29	±0.1	277	550
P(红)	589.6 (T.P.)	862.8 (T.P.)	③	431	704

元素符号	熔　点			沸　点	
	℃	K	误差	℃	K
Pa	1572	1845	—	—	—
Pb	327.502	600.652	—	1750	2023
Pd	1555	1828	±0.4	2964	3237
Pm	102	1315	—	—	—
Po	254	527	—	—	—
Pr	931	1204	—	3512	3785
Pt	1769.0	2042.2	—	3827	4100
Pu	640	913	±1	3230	3503
Ra	700	973	—	—	—
Rb	39.48	312.63	±0.5	688	961
Re	3186	3459	±20	5596	5869
Rh	1963	2236	—	3697	3970
Rn	-71	202	—	-62	211
Ru	2334	2607	±10	4150	4423
S	115.22	388.37	—	444.60	717.75
Sb	630.755	903.905	—	1587	1860
Sc	1541	1814	—	2831	3104
Se	221	494	—	685	958
Si	1414	1687	±2	3267	3540
Sm	1074	1347	—	1791	2064
Sn	231.9681	505.1181	—	2603	2876
Sr	769	1042	—	1382	1655
Ta	3020	3293	—	5458	5731
Tb	1356	1629	—	3223	3496
Tc	2155	2428	±50	4265	4538
Te	449.57	722.72	±0.3	988	1261
Th	1755	2028	±10	4788	5061
Ti	1670	1943	±6	3289	3562
Tl	304	577	±2	1473	1746
Tm	1545	1818	—	1947	2220
U	1135	1408	—	4134	4407
V	1910	2183	±6	3409	3682
W	3422	3695	—	5555	5828
Xe	-111.7582 (T.P.)	161.3918 (T.P.)	±0.0002	-108.12	165.03
Y	1522	1795	—	3338	3611

（续）

元素符号	熔点			沸点		元素符号	熔点			沸点	
	℃	K	误差	℃	K		℃	K	误差	℃	K
Yb	819	1092	—	1194	1467	Zr	1855	2128	±5	4409	4682
Zn	419.58	692.73	—	907	1180						

注：T. P. 表示三相点；S. P. 表示大气压下的升华点。括号里的数值为近似值。

①±300。 ②有不同的三相点。 ③红磷在大气压下不经熔化就会升华。

附录2 在大气压下的元素同素异型变化

元素	转变	温度/℃
Ag	L←→S	0961.93
Al	L←→S	660.452
Am	L←→γ	1176
	γ←→β	1077
	β←→α	769
Ar	L←→S	83.798K
Au	L←→S	1064.43
B	L←→β	2092
Ba	L←→S	727
Be	L←→β	1289
	β←→α	1270
Bi	L←→S	271.442
Bk	L←→S	1050
Br	L←→S	265.9K
Ca	L←→β	842
	β←→α	443
Cd	L←→S	321.108
Ce	L←→δ	798
	δ←→γ	726
	γ←→β	61
	β←→α	—
Cf	L←→β	900
	β←→α	590
Cl	L←→S	172.16K
Cm	L←→β	1345
	β←→γ	1277
Co	L←→α	1495
	α←→ε	422
Cr	L←→S	1863

元素	转变	温度/℃
Cs	L←→S	28.39
Cu	L←→S	1084.87
Dy	L←→β	1412
	β←→α	1381
	α←→α′	-187
Er	L←→S	1529
Es	L←→S	860
Eu	L←→S	822
F	L←→β	53.48K
	β←→α	45.55K
Fe	L←→δ	1538
	δ←→γ	1394
	γ←→α	912
Ga	L←→S	29.7741
Gd	L←→β	1313
	β←→α	1235
Ge	L←→S	938.3
H	L←→S	13.81K
Hf	L←→β	2231
	β←→α	1743
Hg	L←→α	-38.290
Ho	L←→S	1474
I	L←→S	113.6
In	L←→S	156.634
Ir	L←→S	2447
K	L←→S	63.71
Kr	L←→S	115.65K
La	L←→γ	918
	γ←→β	865

元素	转变	温度/℃
	β←→α	310
Li	L←→β	180.6
	β←→α	-193
Lu	L←→S	1663
Mg	L←→S	650
Mn	L←→δ	1246
	δ←→γ	1138
	γ←→β	1100
	β←→α	727
Mo	L←→S	2623
N	L←→β	63146K
	β←→α	35.61K
Na	L←→β	97.8
	β←→α	-233
Nb	L←→S	2469
Nd	L←→β	1021
	β←→α	863
Ne	L←→S	24.563K(T. P.)
Ni	L←→S	1455
Np	L←→γ	639
	γ←→β	576
	β←→α	280
O	L←→γ	54.361K
	γ←→β	43.801K
	β←→α	23.867K
Os	L←→S	3033
P（白α）	L←→α	44.14
Pa	L←→β	1572

（续）

元素	转　变	温度/℃
Pa	β←→α	1170
Pb	L←→S	327.502
Pd	L←→S	1555
Pm	L←→β	1042
	β←→α	890
Po	L←→β	254
	β←→α	54
Pr	L←→β	931
	β←→α	795
Pt	L←→S	1769.0
Pu	L←→ε	640
	ε←→δ′	483
	δ′←→δ	463
	δ←→γ	320
	γ←→β	215
	β←→α	125
Rb	L←→S	39.48
Re	L←→S	3186
Rh	L←→S	1963
Rn	L←→S	-71
Ru	L←→S	2334
S	L←→β	115.22
	β←→α	95.5
Sb	L←→S	630.755
Sc	L←→β	1541
	β←→α	1337
Se	L←→S	221
Si	L←→S	1414
Sm	L←→β	1074
	γ←→β	922
	β←→α	734
Sn	L←→β	231.9681
	β←→α	13
Sr	L←→β	769
	β←→α	547
Ta	L←→S	3020
Tb	L←→β	1356
	β←→α	1289
	α←→α′	-53
Te	L←→S	449.57
Th	L←→β	1755
	β←→α	1360
Ti	L←→β	1670
	β←→α	882
Tl	L←→β	304
	β←→α	230
Tm	L←→S	1545
U	L←→γ	1135
	γ←→β	776
	β←→α	668
V	L←→S	1910
W	L←→S	3422
Xe	L←→S	161.918(T.P.)
Y	L←→β	1522
	β←→α	1478
Yb	L←→γ	819
	γ←→β	795
	β←→α	-3
Zn	L←→S	419.58
Zr	L←→β	1855
	β←→α	863

注：T.P.表示三相点。

第4节　金属性质

金属用途的大小取决于其性质。本章上下文经常使用的“性质”一词是指材料所固有的一些特征之意。更确切地说，一种性质应该是指材料对于一组特定的会对它产生影响的工况条件的响应(例如温度和/或压力)。材料的性质也是材料的基本组织与其成分之间的联系，以及零件和元件的使用功能。

当为某特定的用途要求进行材料的选择和性质的综合时，必须广泛地考虑各种不同的性质。作为材料最重要的性质包括：

- 物理性质，例如质量特征、热学、电学、磁学和光学性质；
- 化学性质，例如耐腐和耐氧化的性能。
- 力学性质(在中文里也常称为力学性能——译者注)，例如拉伸和屈服强度、塑性、韧性和硬度。

本章将讨论上述许多性质。更详细的可以查阅《ASM手册》第2卷中的有关纯金属等更为详细的资料。

物理性质

质量特征

质量特征包括原子量和密度。原子量(或相对原子质量)就是一种元素的每一个原子的平均质量与^{12}C核素的原子质量的1/12的比值。金属元素的相对原子质量已在图1.2-1中列出。术语密度指的是固体材料单位体积所含的质量，通常以g/cm^3为单位，并用希腊字母ρ简单表示。对于固体材料，其密度随温度的升高而减小。室温下不同金属的密度如表1.2-9所示。

表1.2-9　在室温下的一些物理性质

金属	密度 ρ_d/(g/cm³)	比热容量 (Cp)/[kJ/(kg·K)]	线膨胀系数 (α)/[μm/(m·K)]	热导率 (k)/[W/(m·K)]	电导率② (ρ)/(nΩ·m)	金属	密度 ρ_d/(g/cm³)	比热容量 (Cp)/[kJ/(kg·K)]	线膨胀系数 (α)/[μm/(m·K)]	热导率 (k)/[W/(m·K)]	电导率② (ρ)/(nΩ·m)
铝	2.6989	0.900	22.8	247	26.2	锰	7.43	0.475	21.7	7.79	1440
锑	6.697	0.207	8.5~10.8	25.9	370	汞	13.546	0.1396	60.7	8.21	958
砷	5.778	0.328	5.6	—	260	钼	10.22	0.276	5	142	52
钡	3.5	0.26	18	18.4	600	钕	7.008	0.1900	9.6	16.5	643
铍	1.848	1.886	9	210	40	镍	8.902	0.471	13.3	82.9	68.44
铋	9.808	0.122	13.2	8.2	1050	铌	8.57	0.27	7.1	52.3	146
硼	2.45	1.29	8.3	27.4	18×10^{12}	锇	22.58	0.12973	4.6	—	95
镉	8.642	0.230	31.3	97.5	68.3	钯	12.02	0.245	11.76	70	108
钙	1.55	0.6315	22.15	196	31.7	磷(白)	1.83	0.741	125	0.236	10×10^{7}
碳(石墨)①	2.25	0.691	0.6-4.3	23.9	13750	铂	21.45	0.132	9.1	71.1	106
						钚	19.86	0.142	67	6.5	141.4
铈	8.16	0.192	6.3	11.3	744	钾	0.855	0.770	83	108.3	72
铯	1.903)	0.2016	280	18.42	200	镨	6.773	0.1946	6.7	12.5	700
铬	7.19	0.4598	6.2	67	130	钷	7.264	0.188	11	15	750
钴	8.832	0.414	13.8	69.04	52.5	镤	15.43	—	9.9	47	150
铜	8.93	0.3846	16.5	398	16.730	铼	21.02	0.138	6.6	71.2	193
镝	8.551	0.1705	9.9	10.7	926	铑	12.41	0.247	8.3	150	45.1
铒	9.066	0.1680	12.2	14.5	860	铷	1.532	0.33489	90	58.3	115.4
铕	5.244	0.1823	35.0	13.9	900	钌	12.45	0.240	5.05	—	76
钆	7.901	0.2359	9.4	10.5	1310	钐	7.520	0.1962	12.7	13.3	940
镓	5.907	0.3738	18	33.49	150.5	钪	2.989	0.5674	10.2	15.8	562
锗	5.323	0.3217	5.722	58.6	530×10^{6}	硒	4.809	0.317	49	2.48	100
金	19.302	0.128	14.2	317.9	23.5	硅	2.3290	0.713	2.616	156	1×10^{6}
铪	13.31	0.147	519	23	351	银	10.49	0.235	19.0	428	14.7
钬	8.795	0.1649	11.2	16.2	814	钠	0.9674	1.2220	68.93	131.4	47.7
铟	7.30	0.233	24.8	83.7	84	锶	2.6	0.176	—	—	—
铱	22.65	0.130	6.8	147	53	钽	16.6	0.1391	6.5	54.4	135.0
铁	7.870	0.4473	11.8	80.4	97.1	锝	11.5	—	7.05	50.2	185.0
镧	6.146	0.1951	12.1	13.4	615	碲	6.237	0.201	18.2	5.98~6.02	1-50
铅	11.34	0.1287	26.5	33.6	206.43	铽	8.230	0.1818	10.3	11.1	1150
锂	0.5334	3.3054	56	44.0	93.5	铊	11.872	0.130	28	47	150
镥	9.841	0.1503	9.9	16.4	582	钍	11.8	0.11308	10.9	77	157
镁	1.738	1.025	25.2	155	44.5	铥	9.321	0.1598	13.3	16.9	676

（续）

金属	密度 ρ_d/(g/cm³)	比热容量 (Cp)/[kJ/(kg·K)]	线膨胀系数 (α)/[μm/(m·K)]	热导率 (k)/[W/(m·K)]	电导率[②] (ρ)/(nΩ·m)	金属	密度 ρ_d/(g/cm³)	比热容量 (Cp)/[kJ/(kg·K)]	线膨胀系数 (α)/[μm/(m·K)]	热导率 (k)/[W/(m·K)]	电导率[②] (ρ)/(nΩ·m)
锡	5.765	0.205	21	62.8	110	镱	6.903	0.1543	26.3	38.5	250
钛	4.507	0.5223	8.41	11.4	420	钇	4.469	0.2981	10.6	17.2	596
钨	19.254	0.128	3.01~8.87	160	53	锌	7.133	0.382	39.7	113	59.16
铀	19.05	0.117	12	27.6	300	锆	6.505	0.30	5.85	21.1	450
钒	6.16	0.498	8.3	31.0	248						

①碳的金刚石形态的电阻率＞107nΩ·m。　②原文如此，应为电阻率——译者注。

热学性质

熔点和沸点。熔点(*melting point*)是一种纯净材料的固相和液相处于平衡状态的温度。沸点(*boiling point*)则是液体的蒸汽压等于其周围压力的温度：在正常情况下该压力为一个大气压，即1atm(760Torr)。化学元素的熔点和沸点及其同素异形发生相转变的温度在本章第3节后的附录1和附录2中列出。

蒸汽压。一种元素在给定温度下的蒸汽压(*vapor pressure*)与该温度的热力学温度值与这种元素沸点的热力学温度值之比有关系。不同元素的蒸汽压数值列于表1.2-10。

热膨胀。大部分的固体材料都会热胀冷缩。固体材料的长度随温度的变化如下式所示：

$$(l_f - l_o)/l_o = \alpha_l (T_f - T_o)$$

或

$$\Delta l/l_o = \alpha_l \Delta T$$

式中，l_o和l_f分别代表随温度T_o至T_f的初始和终了长度。参数α_l称为线膨胀系数(*line coefficient of thermal expansion*,即CTE)，它作为一种材料性质表示因加热而膨胀的程度，其单位为温度的倒数(K^{-1})或μm/(m·K)。表1.2-9列举了不同材料在室温下的线CTE值。CTE值的大小随温度的升高而增大。一般说，金属的CTE值介于陶瓷(较低值)和聚合物之间(较高值)。

当然，加热或冷却会影响到物体在各个方向的尺寸，即导致体积上的变化。体积的变化可由下式来确定：

$$\Delta V/V_o = \alpha_v \Delta T$$

式中，ΔV和V_o分别为体积的变化和初始体积，α_v代表体积热膨胀系数。许多材料的α_v值是各向异性的，这取决于材料所沿的结晶方向。而对于各向同性的材料来说，α_v约为$3\alpha_l$。

表1.2-10　至一个大气压(1atm＝760mmHg)的元素蒸汽压

元素	压力/atm											
	0.0001		0.001		0.01		0.1		0.5		1.0	
	℃	℉	℃	℉	℃	℉	℃	℉	℃	℉	℃	℉
铝	1110	2030	1263	2305	1461	2662	1713	3115	1940	3524	2056	3733
锑	759	1398	872	1602	1013	1855	1196	2185	1359	2478	1440	2624
砷	308	586	363	685	428	802	499	930	578	1072	610	1130
铋	914	1677	1008	1846	1121	2050	1254	2289	1367	2493	1420	2588
镉	307①	585①	384②	723②	471	880	594	1101	708	1306	765	1409
钙	688	1270	802③	1476③	958②	1756②	1175	2147	1380	2516	1487	2709
碳	3257	5895	3547	6417	3897	7047	4317	7803	4667	8433	4827	8721
铬	1420①	2588①	1594②	2901②	1813	3295	2097	3807	2351	4264	2482	4500
铜	1412	2574	1602	2916	1844	3351	2162	3924	2450	4442	2595	4703

（续）

元素	压力/atm											
	0.0001		0.001		0.01		0.1		0.5		1.0	
	℃	℉	℃	℉	℃	℉	℃	℉	℃	℉	℃	℉
镓	1178	2152	1329	2424	1515	2759	1751	3184	1965	3569	2071	3760
金	1623	2953	1839	3342	2115	3839	2469	4476	2796	5065	2966	5371
铁	1564	2847	1760	3200	2004	3639	2316	4201	2595	4703	2735	4955
铅	815	1499	953	1747	1135	2075	1384	2523	1622	2952	1744	3171
锂	592	1098	707	1305	858	1576	1064	1947	1266	2311	1372	2502
镁	516	%1	608①	1126①	725②	1337②	886	1627	1030	1886	1107	2025
锰	1115④	2039④	1269②	2316②	1476	2889	1750	3182	2019	3666	2151	3904
汞	77.9②	172.2②	120.8	249.4	176.1	349.0	251.3	484.3	321.5	610.7	357	675
钼	2727	4941	3057	5535	3477	6291	4027	7281	4537	8199	4804	8679
镍	1586	2887	1782	3240	2025	3677	2321	4210	2593	4699	2732	4950
铂	2367	4293	2687	4869	3087	5589	3637	6579	4147	7497	4407	7965
钾	261	502	332	630	429	804	565	1051	704	1299	774	1425
铷	223	433	288	550	377	711	497	927	617	1143	679	1254
硒	282	540	347	657	430	806	540	1004	634	1173	680	1256
硅	1572	2862	1707	3105	1867	3393	2057	3735	2217	4023	2287	4149
银	1169	2136	1334	2433	1543	2809	1825	3317	2081	3778	2212	4014
钠	349	660	429	804	534	993	679	1254	819	1506	892	1638
锶	—	—	①	①	877②	1629②	1081	1978	1279	2334	1384	2523
碲	①	①	509②	948②	632	1170	810	1490	991	1816	1087	1989
铊	692	1277	809	1488	962	1764	1166	2131	1359	2478	1457	2655
锡	—	—	—	—	—	—	1932②	3510②	2163	3925	2270	4118
钨	3547	6417	3937	7119	4437	8019	5077	9171	5647	10197	5927	10701
锌	399①	750①	477②	891②	579	1074	717	1323	842	1548	907	1665

①固体状态。　②液体状态。　③β。　④γ。

引自 K. K. Kelley, Vol 383, 1935。

热容量。一种固体材料在加热的时候温度会升高，这表明它吸收了一部分热量。热容量（*heat capacity*）是材料所具有的从外界吸收能量的能力的性质，也就是提高其单位温度所需要的能量。热容量 C 用下式表达：

$$C = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}T$$

式中，$\mathrm{d}Q$ 为温度发生 $\mathrm{d}T$ 的变化所需要的能量。热容量通常用材料的摩尔（如 J/mol · K）规定的。在大部分的实际用途里，比热容量（specific heat capacity）或比热（specific heat）就是单位质量的物体改变温度 1K 所需要的热量，表示为 J/kg · K。较高和较低的热量分别对应于较高和较低的温度。

按照伴随热转变的外界条件有两种实际测量比热容的方法。一种是保持试件的体积不变时的比热容量 C_v（定体积比热容——译者注），另一种是保持外界压力不变时的比热容量 C_p（定压比热容——译者注）。然而，C_p 总是大于 C_v，对于大部分在室温及其以下的固体材料，两者间相差得很小。表 1.2-9 列出了不同金属元素的 C_p 值。

热导率。热传导是一种热量从物质的高温区传送/传递到低温区的现象。表征材料这种传递热的能力的性质就是热导率，并定义为：

$$q = -k(\mathrm{d}T/\mathrm{d}x)$$

式中，q 表示单位时间、单位面积（指的是垂直于流动方向的面积）的热流通量或热流量；k 为热导率；$\mathrm{d}T/\mathrm{d}x$ 通过传导介质的温度梯度。q 和 k 的单位分别为 $\mathrm{W/m^2}$ 和 W/(m · K)（表 1.2-9 中列出了室温下不同金属的 k 值）。应当指出的是上式只对稳定热流量

有效，即处于一种其流量不随时间而变化的情况。式中的负号表示热流量的方向是从热到冷或其温度梯度是向下的。

由于固体金属的高热导率是由金属晶体中自由电子的热振动（以及离子振动）而引起的，故在给定温度下，金属的热导率和电导率是有关系的。两者之间的比值叫做威德曼-弗兰兹比（k/σ），它是由加斯塔夫·亨利奇·威德曼和鲁道夫·弗兰兹比提出来的，并且在20℃时约为1.6×10^{-6}。再者，由于电阻与热力学温度近似成正比，故其比值劳栾兹指数（取名于亨瑞克·安顿·劳栾兹）$k/\sigma T$也近似为常数。然而两种导率之间更为精确的关系是由奔特加和卡尔伦贝奇的方程式所定义：

$$k = A\times\sigma T + B\times T$$

作为给定的金属，式中A和B对于自由电子和离子所起的作用都是不变的。因为相对于电阻率，热导率的测量较为困难，这个关系在估算金属和合金的热导率时还是有用的。

应该指出由于电导率和热导率都依赖于自由电子的移动，因此温度并非影响这些性质的惟一因素。任何使得晶体结构扭曲变形的因素，如离子的热振动、晶体的缺位和移位错、晶粒边界、间隙和溶质离子以及弹性和塑性应变，都会增加传导阻力。

热扩散率。这是对热量遍及金属物体内传播速度的一种有用的度量，这种性质可以通过热导率除以比热容量与密度的乘积的计算得到。热扩散率的单位为m^2/s，其数值表述为在一定温度下作为物体内部以热源点为中心的球形区域向外扩张的速率。

电学性质

作为固体材料最重要的电学特征之一就是它传送电流的流畅性。欧姆定律（取名于乔治·赛蒙·欧姆）用下面的公式描述电流I与作用其上的电压U之间的关系：

$$U = IR$$

式中，R为电流通过材料的阻力。U、I和R的单位分别为伏特（V）、安培（A）和欧姆（Ω）。R的数值受试件的形状影响，对于很多材料，它与电流无关。电阻率以ρ表示，它与试件的形状无关，但是它与R的关系用下列公式表达：

$$\rho = RA/l$$

式中，l为所测电压的两点之间距离，A为垂直于电流方向的横截面面积。ρ的单位是Ω·m（也常表示为μΩ·m和nΩ·m）。由欧姆定律的表达式和前面的公式，可得：

$$\rho = VA/Il$$

有时候用电导率（*electrical conductivity*）σ表征材料的电学性质，它就是电阻率的倒数，即：$\sigma = 1/\rho$。

如表1.2-9所示，金属表现出很大的电阻率范围，从银的低电阻率（高电导率）到锰和铋的高电阻率（低电导率）。金属的电阻率随温度的升高而增加。

也如表1.2-9所示，半金属硼、碳、硅、白磷、硫、锗和碲的电阻率介于金属导体和非金属绝缘体之间。因此，它们叫半导体（*semiconductor*）。它们的电阻率为$10^3\sim10^{13}$Ω·m，而且在某些温度范围里随温度的升高而减小。

磁学性质

所有的金属都有磁学性质，在很多工业应用中这些性质都是很重要的。带电电子的运动会产生磁矩（magnetic moments），而这些电子则处于构成金属晶体结构的原子核的外围轨道上运行。如图1.2-52所示，每一个电子都从两个方面产生磁矩，一方面是其沿轨道运行，另一方面是与此同时所进行的自旋。因为这些磁矩都有特定的方向，故在各单个原子中一些成对电子形成的轨道转矩会相互抵消。自旋磁矩也是一样的。于是，每一个原子的最后形成的磁矩就是这些电子各个转矩的净和（而不是总和）。因此对于其电子层完全充满的原子来说，电子矩全部抵消，故其材料就无法被永久磁化。

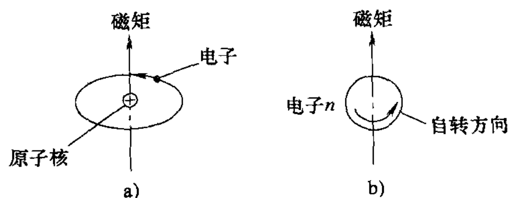


图1.2-52 磁矩的起源

a）轨道运行电子 b）自转电子

磁导率（*magnetic permeability*）是材料磁性的一种度量。它是对于磁力线穿透金属的趋势与它穿越空间相比较而得出的度量。材料磁性的另一种测量就是它的磁化率（*magnetic susceptibility*）。磁化率是金属内的磁化强度与金属所受到的磁化力之比。相对磁导率和相对磁化率都是无量纲的，但磁化率值是以国际单位制（SI）为单位的（即为米-千克-秒或mks），这比它以cgs-emu（厘米-克-秒电磁制）为单位的值大4π倍（在SI和cgs-emu的单位制里，相对磁导率值是一致的）。

金属的磁化率μ由下式定义：

$$B = \mu H$$

式中，H为作用于材料的磁场强度；B为在材料中由此产生的磁通量密度。磁场强度增加，磁通量密度也随之增加直至其材料达到饱和为止(见图1.2-53)。

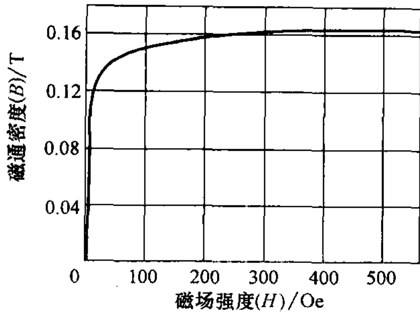


图1.2-53　多晶体铁的磁化曲线

磁性材料的另一个性质是它的饱和磁矩(*saturation magnetic moment*)(表1.2-11)。饱和磁矩的数值就是在磁饱和状态下，材料的一个原子的磁矩与材料中的一个电子的自旋磁矩之比。

表1.2-11和1.2-12列举了一些金属元素的磁学性质。应该指出的是，在金属中发现了多种类型的磁性，从一种类型变到另一种类型的温度也在表1.2-11中列出。如表1.2-11所示，铁并不是展现铁磁性的惟一金属。钴、镍，可能还有钷也能在室温下显示铁磁性。钆以及一些其他稀土金属在非常低的温度下也有铁磁性。铁磁材料就是在低于称为库瑞点(取名于彼尔利·库瑞)的特征温度下，其原子或离子的磁矩不需要磁场的作用就能趋向平行于某一方向的排列，并由此产生“永久”磁矩的材料。当高于库瑞点这些材料就变成顺磁材料。顺磁材料(*paramagnetic materials*)就是其里面原子或离子的永磁性偶极矩只是部分地趋向于一致的排列，且其磁感(磁通量密度)也只是比所作用的磁场强度稍大一些的材料。铁磁金属的磁导率数值可以达到其空间值的10^6倍，而顺磁金属的磁导率仅稍大于空间值。

还有另外三种类型的磁性材料。铁磁性材料(*ferrimagnetic materials*)就是其原子或离子的磁矩在一个低于被称为奈耳点(Néel point得名于Louis E. F. Néel，路易斯·E.·F.·尼尔)的特征温度下的零作用磁场里，趋于显示有规则但又不平行的排列。而反铁磁材料(*antiferrimagnetic materials*)就是其原子或离子的磁矩在零作用磁场里，趋于显示有规则的排列，以致在奈耳点以下其磁矩的矢量和为零。反铁磁材料的磁导率与顺磁材料的是可以相比的。超过奈耳点的这两种材料都将变成顺磁性。抗磁材料(*diamagnetic material*)就是其磁感略小于作用磁场的材料。对于抗磁材料，其磁导率比在空间的还要略小一些，它的磁化率是负的，并且很小。

图1.2-54所示是铁磁、顺磁和抗磁三种材料的相应性质的比较。有关金属和合金磁学特性的其他内容将在本手册的第3篇第14章里介绍。

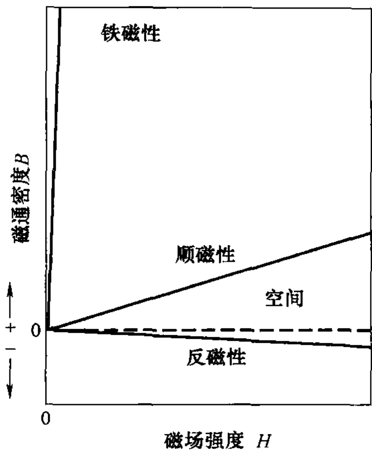


图1.2-54　反磁、顺磁和铁磁材料的磁通密度B-磁场强度H曲线

表1.2-11　金属元素的磁相转变温度

化学符号	原子序数	同素异形体	相转变温度(T_c)/K	磁序种类①	相转变温度(T_{c2})/K	磁序种类①	相转变温度(T_{c3})/K	磁序种类①	饱和磁矩/μB
Ce②	58	β-dcph	13.7	AC?	12.5	AC?	—	—	2.61
		γ-fcc	14.4	AC?	—	—	—	—	—
Cm	96	α-dcph	52	AC	—	—	—	—	—
Co	27	fcc	1388(1115℃)	PM	—	—	—	—	1.715
Cr	24	bcc	312.7(39.5℃)	AI	—	—	—	—	0.45
Dy	66	α-cph	179.0	AI	89.0	FM	—	—	10.33
Er	68	cph	85.0	AI	53	AC	20.0	CF	9.1
Eu	63	bcc	90.4	AC	—	—	—	—	5.9

（续）

化学符号	原子序数	同素异形体	相转变温度 (T_c)/K	磁序种类①	相转变温度 (T_{c2})/K	磁序种类①	相转变温度 (T_{c3})/K	磁序种类①	饱和磁矩/μB
Fe③	26	α-bcc	1044(771℃)	PM	—	—	—	—	2.216
		γ-fcc	67	AC	—	—	—	—	0.75
Gd	64	α-cph	293.4(20.2℃)	FM	—	—	—	—	0.75
Ho	67	cph	132.0	AI	20.0	CF	—	—	10.34
Mn	25	α-bcc	100	AC	—	—	—	—	④
Nd	60	α-dcph	19.9	AI	7.5	AC	—	—	1.84
Ni	28	fcc	627.4(354.2℃)	FM	—	—	—	—	0.616
Pm	61	α-dcph	98	FM?	—	—	—	—	0.24
Pr	59	α-dcph	0.06	AC	—	—	—	—	0.36
Sm	62	α-rhomb	106	h，A⑤	13.8	c，A⑤	—	—	0.1
Tb	65	α-cph	230.0	AI	219.5	FM	—	—	9.34
Tm	69	cph	58.0	AI	40-32	FI	—	—	7.14

①FM，从顺磁转变为铁磁状态；AC，转变为周期性(反铁磁)状态，即有与晶格周期性同等大小的状态(例如方向由上三层到下三层原子的自转，等)；AI，转变为周期性(反铁磁)状态，但一般有与晶格周期性不同等大小的状态(如螺旋形的自转顺序)；CF，转变为圆锥形的铁磁状态(平面上的螺旋形反铁磁再加上铁磁分量的组合)；以及FI，转变为铁磁的周期性结构(上下不等数量的自转层)。　②Ce的存在有五种晶体结构，其中两种为磁性的(γ-fcc和β-dcph)。γCe是通过fcc Ce-La合金的外推而估计为低于14.4K的反铁磁体。(αCe低于≈100K不存在纯净形式。)据认为βCe在13.7K以下的六角体和12.5K以下的立方体晶格位置里呈现为反铁磁性。　③表中所列γFe的磁性是从沉积在铜上的fcc Fe上测量的。　④Mn的磁矩确定是复杂的。　⑤h，A；c，A；表明六角体和立方体晶格位置里反铁磁化的点对称顺序，但所处的温度不同。

引自J. J. Rhyne，*Bull. Alloy Phase Diagrams*，Vol 3(No.3)，1982，p402。

表1.2-12　室温下顺磁和反磁材料的磁化率

顺磁材料		反磁材料	
材料	磁化率(体积) 国际单位制	材料	磁化率(体积) 国际单位制
铝	2.07×10^{-5}	铜	-0.96×10^{-5}
铬	3.13×10^{-4}	金	-3.44×10^{-5}
钼	1.19×10^{-4}	汞	-2.85×10^{-5}
钠	8.48×10^{-6}	硅	-0.41×10^{-5}
钛	1.81×10^{-4}	银	-2.38×10^{-5}
锆	1.09×10^{-4}	锌	-1.56×10^{-5}

光学性质

光滑、裸露和未氧化的金属表面的若干光学性质，对于某些用途来说是至关重要的。其中四种为阳光反射率(*solar reflectivity*)(太阳光中的闪烁性)、阳光吸收率(*solar absorptivity*)(从太阳光取暖)、热辐射率(*thermal emissivity*)(热体通过辐射冷却)和颜色(在词尾加上"率"字，意喻对粗糙表面上的该性质的测量)。金属的反射率高，则吸收率低。然而应当记住这些性质的数值，都仅适用于光滑、干净和无氧化的裸露表面，它们在实际使用的金属和合金中很少见。而金属表面几乎总是被某种氧化层或油漆所覆盖的，两者的反射性相对较低，但是具有非金属的高吸收性。作为例外的是惰性金属(如后文所述)，它们通常都是裸露的。

干净、裸露和未氧化的金属表面是有光泽的。其颜色除了两种特殊情况外都介于从银灰到不同深浅的白色的范围之内。两种特殊情况就是淡红色的铜和金黄色的金，这是由它们电子的配置所致。鉴于它们的化学活动性，大部分金属的新鲜裸露表面都会很快形成薄薄的氧化物，这些氧化物则会影响它们的外观(如后文所述)。

辐射性质

在某些工业中，描述金属对于辐射穿透或不穿透的性质是很重要的。用于制造存放X射线胶片外壳的金属应当能被X射线穿透(与铅相反，它不能吸收X射线)，当将其置于机器里拍摄X射线胶片时，射线能顺利穿透外壳使胶片感光。利用金属的热中子横截面定义金属从中子反应堆中吸收热(慢速)中子所达到的程度，因此锆的低热中子横截面使其成为一种

很好的核燃料容器材料。

化学性质

作为结构材料，金属最重要的化学性质是它的腐蚀性状。大部分的金属基本上都有碱性（能与酸发生反应）。但是如上所述，由于金属元素的化学活动性，大部分金属都会很快在其新鲜裸露的表面形成薄薄的氧化物。钌、铑、钯、银、锇、铱、铂和金除外，这八种金属的化学活动性极低，所以被称为惰性金属（noble metal）。

然而在各种非惰性金属表面上所形成的氧化物的物理和化学性质也都不尽相同。有些氧化物以物理的方式牢固地附于基体金属上，而另一些却容易发生剥落或片状脱落，而让其新鲜的基体金属暴露在空气之中。而且，有些氧化物是非常致密的并防渗透，从而使得非常少的氧气能渗入金属基体，而另一些却很疏松，以致基体金属的氧化反应易于连续不断地进行。

氧化物的化学性状各有差异，这就影响了其与不同外界条件（包括油漆）的兼容性。其中许多氧化物的化学性质都呈碱性的。碱金属的氧化物有很强的碱性，而碱土金属则呈现中等强度的碱性。周期表里13组的金属氧化物（如铝）是属于双性的（即强酸和碱都可与之反应）。大多数过渡元素的氧化物都是弱碱性，但其中许多也是双性的。由此，氧化铁（Fe_2O_3）可以与强碱发生反应。一般说来，在周期表里越靠右边的金属，其氧化物的碱性也越弱。在很多情况里的金属氧化物都有保护性，还应指出的是大部分裸露的作为结构材料的金属都有很强的化学活动性，一旦它们的氧化物保护膜遭到破坏就会很快与周围环境发生反应。

一般性的金属腐蚀性状

下面将讨论几种结构上常用金属的一般性腐蚀性状。更详细的内容可参阅本手册中这些金属及其合金的相关章节。

锡。它也受到一层非常薄的氧化物（SnO_2）的保护，该保护层是较不易渗透，粘附且十分透明的。其氧化层又有很好的非金属热辐射性，可是由于非常薄且十分透明，所以表面总具有与裸锡同样好的反射性。

铜。在潮湿环境里，为铜主要起保护作用的腐蚀性产物就是 Cu_2O。这种氧化层并不防渗透，但其良好的粘附性能为防止进一步腐蚀提供很好的保护。在水下环境里，一种由氯化铜或碳酸铜薄膜构成的铜绿具有很好的吸附性和保护性，有时还有 Cu_2O 作为其内层。

铝。在铝表面最早生成的氧化物，既十分防渗透又极具粘附性（虽然有些灰色氧化物会被擦去）。因此，其基体金属的氧化进程受到阻碍甚至停止，而且氧化膜依然非常薄并十分透明（大约 1nm 厚）。然而，暴露在空气中的裸体金属表面所生成的腐蚀性产物很少仅是一层简单氧化物，就像作为铝的一部分的 Al_2O_3 保护薄层。在潮湿空气中，它会形成一层更具渗透性的经水合作用的氧化物 $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ 覆盖在整个铝的氧化膜上，也正是这两种腐蚀性产物的化学性质主导了铝的化学性状。

钛。在潮湿环境中，其表面所生成的典型氧化物为 TiO_2，也可以由其他氧化物，如 Ti_2O_3 和 TiO 混合组成。TiO_2 是一种典型的厚度小于 10nm 的薄膜，所以也是不可见的。像锡、铜和铝一样，其氧化物表面同时具有很好的辐射性和反射性。此外，它还具有对氧（和氢）的防渗透性和高化学稳定性，故很少有物质能侵蚀它。

铁。在铁表面生成的氧化物远不如上面所介绍的金属氧化物那样致密。因此氧化铁锈层非常容易被渗透，且很快就会形成一层易于看到的厚度层（因为其浅红颜色看起来更为明显），该锈层进而不断增厚，直到其基体金属发生转变。锈层还很容易成片状并被擦落。然而这种锈层是由水合氧化物而不是简单的氧化物所组成的，所以这种水合氧化物一经干燥就会失去水分转而变成为无水 FeO 和 Fe_2O_3。除此之外，在 FeO 和 Fe_2O_3 之间还常会形成一层 Fe_3O_4（$FeO \cdot Fe_2O_3$），并发现以 FeOOH 的不同晶体形式存在于构成铁（和钢）的复合物的复杂系统里。这种锈膜的成分及其腐蚀性状取决于氧的存在、湿度、温度及当时大气污染的程度。在潮湿环境里，pH 影响铁和钢的腐蚀。不过在碱性环境中锈膜却能为铁和钢提供某种保护，但是在低 pH 条件下，氢的析出会有削弱这种保护作用的倾向。

镁。在镁的表面首先形成的是氢氧化物 $Mg(OH)_2$。然后这种氢氧化物再与环境中的碳酸发生反应生成不同的碳酸盐水合物，包括 $MgCO_3 \cdot H_2O$、$MgCO_3 \cdot 5H_2O$ 和 $3MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$。在有硫化合物污染的大气中，其表面膜中还会含有亚硫酸镁或硫酸镁，如 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$。这是一种可渗透的灰色薄膜，故由于较强的粘附性而不易被擦去。

锌。由于能生成不可溶的碱性碳酸盐而保护金属表面，所以在大气中有很强的耐腐蚀性。

力学性能

弹性。当晶体受到一个内部或外部载荷的应力作

用时，由于其里面原子(离子)的相对移动而会使晶格产生一种力，从而消除这种应力作用的反应。晶体或多晶物体会因为这种应力而产生尺寸的变化，故应变就是对这种变化的度量。当载荷撤去时，晶体或物体只要其里面所有的原子还能保持着其原先的相邻关系，就将恢复到原来的大小。满足上述条件的应变就是弹性的(晶体或物体经受了弹性变形，*elastic deformation*)，并且应变的大小与作用于晶体或物体上的应力成正比。这个比例叫做胡克定律(*Hooke's law*,取名于罗伯特·胡克)。

作用应力与弹性应变之间的关系叫做材料的弹性模量(*modulus of elasticity*)。在一维拉伸或压缩载荷作用下得到的模量又叫做杨氏模量(*Young's modulus*) E(取名于汤姆斯·杨)，而扭转或剪切载荷又得出刚度(*rigidity*)或切变模量(*shear modulua*) G。杨氏模量(弹性模量)和切变模量间的关系由下式决定，式中，包含泊松比(*Poisson's ratio*) ν(取名于丹尼斯·泊松)，它是受载材料中横向应变与轴向应变的比值：

$$\nu = (E - 2G)/2G$$

静液压缩会造成材料在体积上的收缩。其体积的单位变化与平均法向(垂直方向)压应力之比叫做材料的压缩比(*compressilbility*) β。压缩比的倒数(作用于材料的平均法向压力与其体积的单位收缩之比)叫做材料的体积弹性模量(*bulk modulus*) K。表1.2-13列出几种金属的弹性模量值。

表1.2-13 室温下部分金属的力学性能

金 属	弹性模量(E)/GPa	切变模量(G)/GPa	泊松比 ν	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)
铝	67	25	0.345	15~20	40~50	50~70
铍	303	142	0.07	262~269	380~413	2~5
钙	55	19.2	0.43	—	69~83	50
铬	248	104	0.210	—	83	0
钴	211	80	0.32	758	945	22
铜	128	46.8	0.308	33.3	209	33.3
金	78	27	0.4498	—	103	30
铁	208.2	80.65	0.291	130	265	43~48
铅	26.1	5.6	0.44	9	15	48
镁	44	16.3	0.35	21	90	2~6
钼	325	260	0.293	200	600	60
镍	207	70	0.31	59	317	30
铌	103	37.5	0.38	—	585	5
银	71.0	26	0.37	—	125	48
锡	44.3	16.6	0.33	9	—	53
钛	120	45.6	0.361	140	235	54
钨	345	134	0.283	350	150	40
锌	69~138	—	—	—	—	—
锆	49.3	18.3	0.35	230	—	32

塑性。当超过作为整体材料的弹性极限时，晶体或物体中并非所有的原子都能在应力作用下保持其原先的相邻关系(由于滑移和/或扭转)，这样就在弹性应变上再加上一个塑性应变的增量，并以此构成晶体或物体的全部总应变。因此，可以认为在该点，材料已经开始发生屈服。然后再把载荷撤去，塑性应变被保留下来，晶体或物体经过永久变形后，留下了永久性的残余形变。

应变-应力曲线。通过对材料试件的测试，将所作用的名义应力（载荷除以初始横截面积）和产生的应变（单位变形）之间的关系画成曲线，用于揭示该材料试件许多力学性能方面的信息。图1.2-55所示

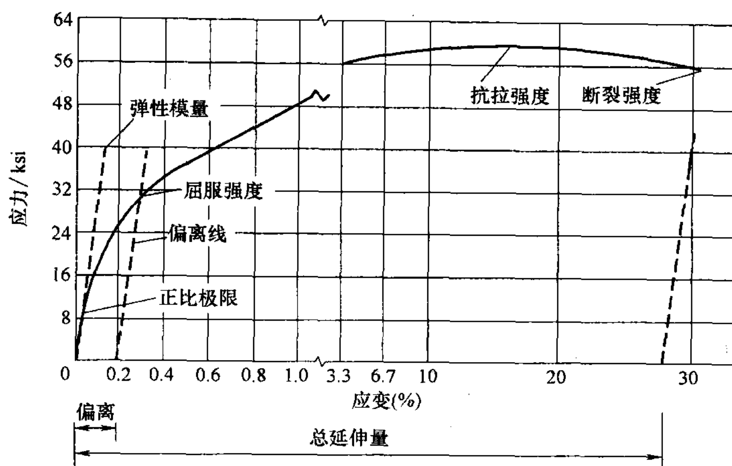


图1.2-55　非铁金属典型的拉应力-应变曲线

是一种典型纯金属的拉应力-应变曲线。制备一种中间有一段横截面减小的、作为“计量”用的试件，测出该截面的面积，再在其截面处标记一段标准计量长度（常为50mm或2in）。先加预载，金属试件开始延伸的同时横截面发生收缩（如果载荷是压缩，则横截面扩张），于是应变-应力曲线沿其模量直线达到比例极限（*proportional limit*），该点与其弹性极限基本上为同一点。对于大部分金属来说，这个极限值太低，很难从应变-应力曲线上确定金属弹性模量的精确值，因此常利用声振试验来测定金属的这个数值。

当载荷达到弹性极限，脆性金属（如铬）就会发生断裂而不会经历塑性变形。对于塑性金属加载并超过其弹性极限，在弹性应变上所叠加的塑性变形将导致总应变的增加速度大大超过此前的增加速度，而且绘出的曲线也从模量直线脱离开。因为要从应力-应变曲线上确定屈服开始发生的那一点是很困难的，故使所使用的“屈服”定义产生随意性。在许多试验标准里，大多数金属都利用一条平行于模量直线并相对于它的应变偏移为0.2%的直线与应力-应变曲线的相交点处的应力，定义为该金属的屈服强度（见图1.2-55）。

还应记住，作用于试件上的应力通常是名义应力，而不是真实应力。在曲线的初始部分，试件的横向收缩（变细）量是沿试件的整个试验长度上分布的，因此其收缩量极小，故名义和真实应力几乎是一致的。但是到了试验的后面部分，拉伸试件发生缩颈，即试件的细化开始集中于最终发生断裂处附近。尽管真实应力直至断裂的发生时还在继续增加，但此时，这种缩颈常变得非常显著，以致其名义应力已随载荷的增加而减小，如图1.2-55所示。

如图1.2-55所示的名义拉应力对应变的曲线有时称为工程应力-应变曲线，以此区别于真实应力-应变曲线（也见图1.2-56）。工程应力-应变曲线的最高点在试验标准中被定义为试件的抗拉强度，或就称为抗拉强度。断裂点称为断裂强度或抗断强度。发生断裂时，试件的弹性能量被释放出来，并使弹性应变得到恢复。而保留在试件里的塑性应变称为总伸长，即通过将断裂的两段拼在一起测量出计量标记之间的新距离。通过测量断裂颈口处的尺寸，将其面积与原来的截面积进行比较，就可得到断裂试件的面积收缩量。除了拉/压应力-应变曲线外，偶尔还需要求出扭转和/或承压曲线。表1.2-13列出了若干种退火金属的主要强度及其总伸长。

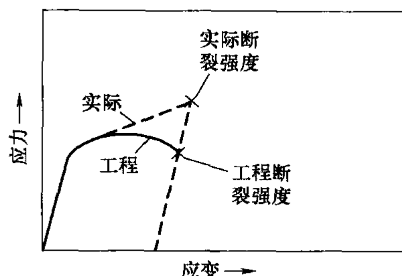


图1.2-56　实际断裂强度与工程断裂强度的对照

现代设计理念除了表1.2-13提供的模量、强度和伸长率的数据之外，有时还要求对应力-应变曲线作出更好的解释。因此，有时应力-应变曲线本身也要更新，但其改变通常也只是涉及伸长率百分之几的部分。也有时，其最终曲线图上并没有示出应变，而代之以用割线模量和切线模量表示应力-应变曲线的斜率。如图1.2-57所示，将应力-应变曲线上的某一

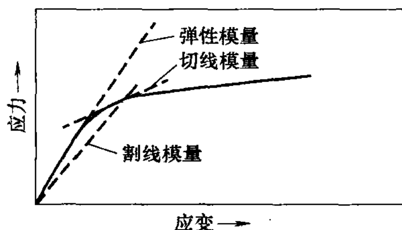


图1.2-57　从一种应力-应变曲线导出的三种典型的模量比

点切线模量定义为应力-应变曲线在该点切线的斜率，而某一点的割线模量就是应力-应变曲线的起始点与曲线上该点连线的斜率。

铁里即使只含有少量碳，其应力-应变曲线也与纯金属的曲线不一样。如图 1.2-58 所示，在屈服开始发生的那一点称为屈服点或上屈服点，这是一个十分敏感的定义。因为一旦相应于该点的应力被超过，那么塑性变形所需要的应力就明显下滑到一个称为下屈服点的水平上，然后像纯金属一样，其曲线又开始上升。通常用上屈服点而不是下屈服点的应力作为材料的屈服强度。

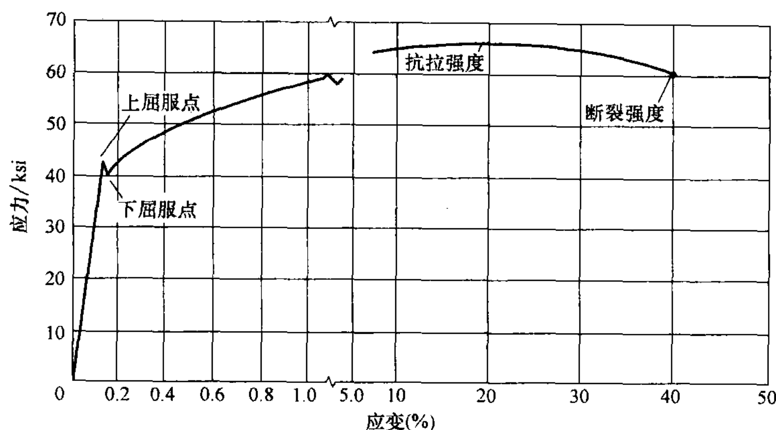


图 1.2-58 $w(C)$为 0.15%的铁的典型应力-应变曲线

蠕变。该术语用于表述与时间相关的塑性变形，即蠕变应变(*creep strin*)，它是当材料承受不变的名义应力时发生的。把由初始载荷所引起的非时间相关的应变叠加于蠕变应变上便可得到总应变(但不包括因加热到试验温度而产生的热膨胀)。大部分的蠕变试验都是在拉伸条件下和对所试验的材料而言相对较高的温度里进行的，并用名词蠕变伸长和总伸长表示其试验结果。如图 1.2-59 所示，在初始载荷作用下的蠕变应变的速度是相当快的，但随时间而减慢，这叫做初始蠕变。随后其蠕变速度达到某一最小值，并在一段时间里保持恒定，这时称为二次蠕变。在第三阶段的蠕变或三次蠕变中，蠕变速度再次开始增加，并持续增加到试件的破裂(如果试验能继续到这一点)。以上三部分在达到破裂的总时间中所占的份额比例取决于若干因素，在有些试验里，第二阶段在其曲线图上缩短为一个点，这时从曲率的减小即刻变为增加。

蠕变试验的结果可以不同的方式报告。有时对于给定温度(特别是短时间的高温试验)，其试验结果采用等时应力-应变曲线(*isochronous stress-strain*

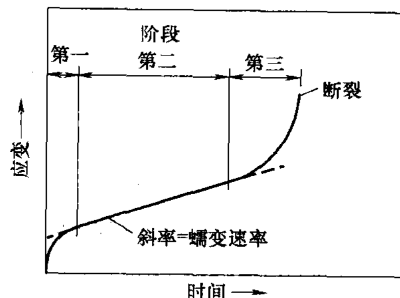


图 1.2-59 蠕变曲线的三阶段

curves)的形式报告，即其曲线是用表示蠕变试验中应力-应变关系的等时点画出的(见图 1.2-60)。再利用在该试验温度下另外测得的模量值，将等时应力-应变曲线的弹性部分加在图上。在该温度下，产生特定应变的应力则称为材料在当时条件下的蠕变强度(蠕变强度一词有时也用于表述在该温度下形成特定二次蠕变速度时的应力)。另外，有时也在应力-时间曲线图上绘出在给定温度下的等应变结果曲线。

若连续进行蠕变试验直至试件发生断裂，这种试验就叫做蠕变断裂(creep rupture)或应力断裂(stress rupture)试验，以应力对应发生断裂所花的时间绘制的曲线作为其试验结果的报告。

疲劳。在周期性应力的重复作用下，材料发生破裂的倾向叫做疲劳(*fatigue*)。疲劳断裂不同于韧性断裂，后者通常是由常规的拉伸和蠕变载荷造成的，而前者是由裂纹的扩张所造成的，裂纹是从材料中的一点或几个点起源的，而且疲劳断裂都属于脆性断裂。大部分的零件和试件总含有一些应力集中点，如零件或试件的表面粗糙度及其截面的变化，在这些地方的

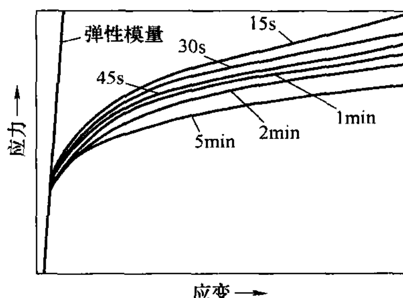


图 1.2-60 在给定温度下，材料蠕变试验的等时点应力-应变曲线

应力产生集中，故疲劳裂纹也由此起源。其集中的程度(根据纯弹特性)可以作为理论应力集中系数(theoretical stress-concentration factor)或应力集中系数(*stress-concentration factor*) K_t 来测定和提供。疲劳强度减小系数或疲劳凹槽系数可以用光滑(无凹槽)试件的疲劳强度除以带凹槽试件的疲劳强度求得。将疲劳强度减小系数与理论应力集中系数比较就，可以得到材料在周期载荷作用下对凹槽的敏感度，凹槽敏感度就是疲劳系数除以 K_t-1，并用百分比来表达。

现在已经有若干种不同的疲劳试验方法，且每一种都是按特定工业中实际应用的方式设计其重复性加载条件。回旋射束试验以路轨轴的重复性加载方式，弯板试验以板簧的重复性加载方式，轴向往复试验则以连杆滑块的重复性加载方式。一些试验是在不变的载荷下进行，而也有一些是在不变的应变下进行的。因此，列表的疲劳强度或疲劳极限值主要是在材料筛选时有意义，而不能用于实际的设计计算。

疲劳试验的应力通常都是在最大拉应力和最小拉应力，或者最大拉应力和最大压应力之间进行周期性的变化。这两个极值之比(压应力以负应力考虑)称为应力比 R。这个比值对于全交变应力为 -1。表述疲劳应力的其他术语还包括中值应力(两个极值间的中间值)、应力范围(两个极值之间的应力变化)和应力幅值(中值与其中一个极值之间的应力变化)。

疲劳试验的结果通常是以应力对应试验至发生断裂所达到的周期数量的曲线(称为 $S-N$ 曲线)形式作为其报告。在其图中周期数量坐标通常用对数刻度(有时应力也用这种刻度)。大部分金属的 $S-N$ 曲线表明，在较低的应力下能延续更长的寿命，并且材料的疲劳强度的报告必须以一定的周期数量为前提(以及试验用的应力比,如果试件是带凹槽的还有应力集中系数)。然而对于钢，曲线在称为疲劳极限的某一水平上会折断，并基本变成水平线(见图 1.2-61)。

有些疲劳试验是用断裂力学的方法进行研究的。这将在本手册(下册)第5篇第1章里予以介绍。

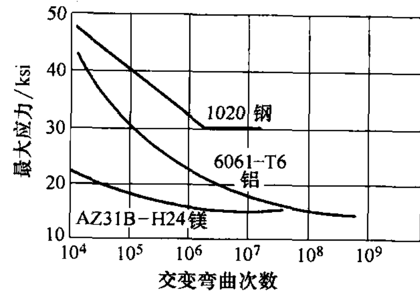


图 1.2-61 疲劳曲线的比较

韧度。一般来说，韧度就是在使材料从变形到断裂的过程中，对其所吸收的能量的度量。在韧度测量中，试件的形状和载荷的作用方式是很重要的。当在动载条件(高应变率)下且有凹槽(即应力集中点)时，可以通过冲击试验(见本手册(下册)第5篇第4章) 评价该凹槽的韧度。在线性断裂力学中，用于测量韧度的一种特殊方法叫断裂韧度(即在有裂纹存在的情况下,材料抗断裂的能力)。这是一个定标系数，也叫临界应力强度系数(*critical stress-intensity factor*) K；它表述的是已知形状和大小的裂纹一旦开始快速扩张，处于其裂纹尖端的作用应力的增强度。本手册(下册)第5篇第1章和第4章中将详细介绍有关断裂韧度和断裂力学的内容。

在静态(低应变)的情况下，韧度可以从拉应力-应变试验结果中求得。它就是在应力-应变曲线一直到断裂点的曲线下面的面积。

硬度是材料阻止发生塑性凹坑的能力。当硬度的测定只是一种简单的压痕试验或回跳试验时，它通常就是指利用一种标准形状和材料的压头所压出来的压痕大小。硬度值与金属的强度近似成正比(例如,见本篇第1章中的硬度换算表)，并且用于表征其磨损性(耐磨粒磨损)。因此当实际应用中选用了适当材料时，硬度值是很有用的。在质量管理的运作过程中，它也是非常有用的，但是其数值不能直接作为参数用于零件设计。本手册(下册)第5篇第4章还将详细阐述硬度试验。

第 3 章　设计依据和材料选用

本章中的许多内容引自《ASM 手册》，第 20 卷材料选用和设计，1997。从该手册还可以查阅其他有关设计、材料性质与选用方面的资料。

第 1 节　引论和概述

工程设计可以将其定义为一种能满足一定需求的产品的创造。一个好的设计所造就的产品应当在满足法律、社会、安全和可靠的前提下，有效且经济的完成其功能。为了满足这样的要求，作为设计工程师必须考虑到以下许多不同的因素：

- 功能和消费者的要求，如能力、大小、重量、安全、设计法规、预期使用寿命、可靠性、保养、容易操作、易于维修、失效频率、初次成本、款式、人体学因素、噪声水平、污染、要求的使用环境，以及可再生利用的可能性。
- 与材料有关的因素，如强度、塑性、韧性、刚度、密度、耐腐蚀性、耐磨性、摩擦因数、熔点、导热/电率、可加工性、可回收性、成本、便于储存的尺寸及其交货时间。
- 与制造有关的因素，如制造工艺性、精度、表面粗糙度、形状、尺寸、要求的数量、交货期、成本和要求的质量。

图 1. 3-1 表示的是以上各组因素之间的关系。它还表达了材料性质与制造工艺性、功能和制造工艺性以及功能和材料性质之间的第二层关系。

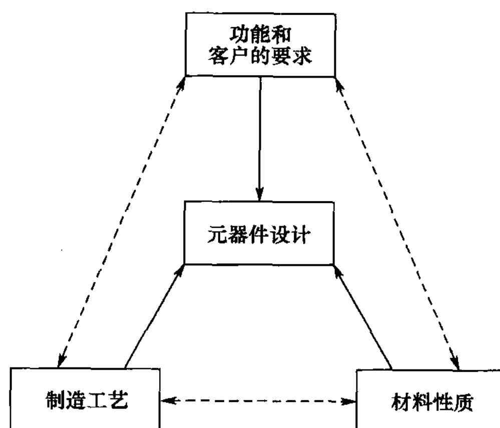


图 1. 3-1　元器件设计中应该考虑的因素。引自参考文献[1]

图 1. 3-2 表明，工程设计实际上是把新产品推向市场更为广阔过程中的一个重要组成部分。而这个全过程被赋予的名称就是产品的实现过程（*Product Realization Process*），即 PRP。如图 1. 3-2 所示，作为一家公司的 PRP 工程设计基本上是在市场运作与制造过程之间进行的。但是工程设计并不是一项孤立的活

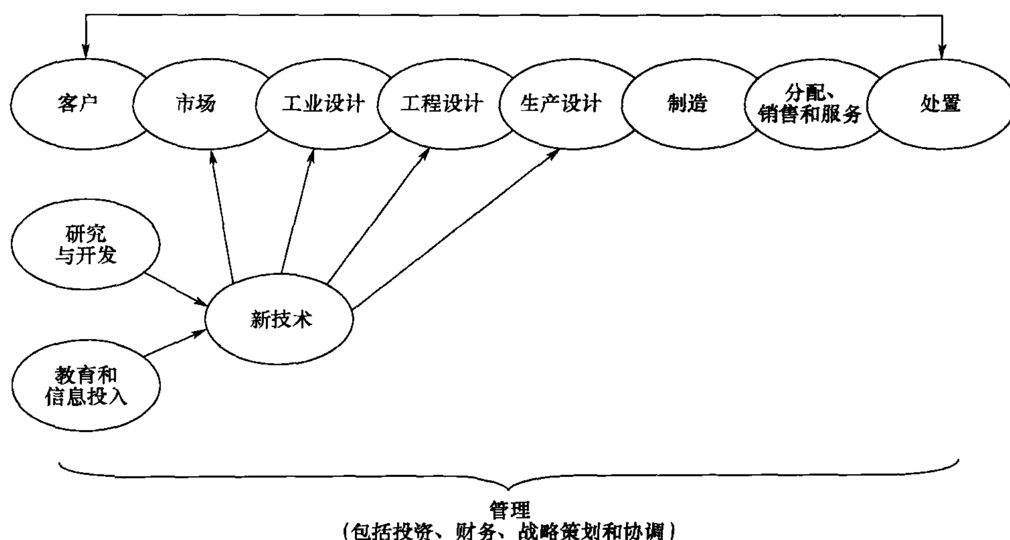


图 1. 3-2　作为产品实现过程中一部分的工程设计

动，它影响制造业的所有其他环节，同时也受它们所影响。遗憾的是过去，设计与制造业的其他部门之间的关系并没有被充分地认识。然而直到最近，在很大程度上迫于国际竞争的压力，为了提升质量、降低成本和缩短产品生产周期，才得以开辟了产品更新设计和开发的新途径。一般称为同步工程(*concurrent engineering*)，即产品从设计项目一开始就使所有与产品开发有关的环节，包括设计、制造、市场的专家团队一起工作。这就为更好地选用材料开创了新的契机，同时也促进了以计算机为工具的设计平台的发展。

本节引论以及本章后两节讨论了作为实现产品组织中一员的材料工程师的各种作用和责任，并且建议材料工程师们以各种新方法使其组织受益。材料、工艺和产品设计的整合有赖于经过材料选用培训以及能够在团队氛围中工作的所有个人。往往正是这些熟悉设计、生产和市场之间存在着相互制约要求的工程师和专家，才能够发挥瞄准最终产品的媒介作用。

设计的主要依据

设计过程。材料工程师的作用就是要能在设计过程中通过多种不同的途径解决问题。其任务就是要求设计一种与已有零件近似一致，并预期能以同样的方式使用的“新”零件。在这种情况下，就有可能使用与现有零件相同的材料和工艺。另一方面，其任务也可以是为一新零件进行设计和选择材料。显然这是更为复杂的任务，要求知道载荷、载荷分布、环境条件和许多其他性能要素(包括客户的意愿)及与制造有关的因素。

除了需要知道所要求的性能特征以外，材料的选用者必须能确定和估算因制造而引起的材料性质的变化。不同的生产方法，如受控或不受控的热处理和机械加工，都会对材料的性质以及最终的零件或装配的成本造成不同的影响。制造商往往也正是通过这种由制造工艺产生的不同效果与客户的需求之间的联系，利用基本相同的材料与工艺组合创造出超过其他产品的优势。

关键的是要懂得和接受这样一个事实：制造工艺的选择往往不受材料选择专家的直接指导。事实上，到目前为止，作为一种设计的理念和原始构思还仅限于纸面上或计算机辅助系统(CAD)里，有效的产品成本所要求的制造工艺及其工艺流程通常是设定不变的。它们已不再是一些无需重新设计就能控制的变量。

设计规范及其理念。材料的选择并不止于满足对其有关强度、疲劳、耐腐或耐磨的性能的最低要求。作为产品设计和材料选用会有很多选择方案，往往是数不胜数。这就使得数学优化程序难以适用，而不得不倚重于经验。当涉及定性的非特性考虑的一类“软问题”时，经验将是最为重要的。

设计必须是可生产的。这就是意味着必须选择一些成熟的工艺，它们有为大家所知悉的统计偏差，以使成品零件或其技术参数得以控制在指标范围以内。这种遵循制造工艺性的设计方法正在变得很普遍，并成为经集成的产品开发团队工具库中所必不可少的工具，并且从提高质量和降低成本方面已经被证明是有效的。

在预期的产品寿命里，使产品的总体成本(即寿命周期成本)最小化对客户来说是另一个挑战。这些成本包括原材料、生产、使用、维护(定期的或非定期的)以及处置或回收成本。其中有些成本要素是未知的。这也是要把工程的艺术和技巧结合起来所面临的最为严峻的课题。

当要对与产品设计和材料选用有关的安全、可靠以及保质期成本所显露出来的方方面面加以考虑时，会产生类似的问题。为此在很多情况里我们可以选择另一种设计和材料而无碍大局。然而，在很多别的情况里，必须采用特定的设计和材料，以规避发生产品所不应有的失效模式。因此，为了达到一种安全且可靠的设计，对零件、组装及整个结构会如何失效及由此产生的问题必须要有深刻的了解。

鉴于日益严格的环境和法规要求，制造商必须考虑在产品的整个寿命周期里能够回收和再生其产品，并处理其废弃物。这就需要在考虑所有的选择方案时更新我们的侧重点。元器件的材料或制造工艺的改变应当包括与环境友善的产品设计。镀铬的改变看似对环境友善，但是如今已建成的镀铬厂家都在零排放中操作，这样就是不使用铬也不见得有任何明显的益处。阳极化电镀工艺也可认为是干净的。但另一方面应该仔细考查油漆在其过程中的排放及随后消费者的不当处置。还有，把零件的本体由金属改为塑料也并不一定是解决的好办法，因为从全球水平来看，用于材料再生的塑料回收处理的基础设施尚不够理想。

另一个设计要素就是产品的可修理性。人们并不想让汽车发生车祸，但还是会发生。设计和材料的选用如仅从其初始成本和功能的因素出发，则会导致作为单体零件的塑料材料的广泛使用，然而塑料在很多情况下是不可修理的。修理成本高至用户感到无法接受的产品则最终要遭到市场的淘汰。

选用材料的主要依据

正确选用材料是设计中的关键步骤，因为它作为

至关重要的决定不但要与计算机的计算相联系，还要体现在实施设计的工程图样上。材料以及将材料转变为有用的零件的工艺是全部工程设计的基础。有多达100000种的工程材料可供选择的这一事实造成在材料选用上做出正确决断的艰难性。从更为实际的层面上说，作为一个典型设计工程师的手头上应当有50~80种材料，这取决于其应用范围。

近年来，材料选用在设计中的重要性更加凸显。同步工程的采用（见后面的讨论）使材料工程师在更早的阶段参与设计过程，而且在现今的产品设计中，制造被赋予的重要性更增强了这样一个事实：为了达到最后所要求的性能，材料与制造两者结合得更加紧密。不仅如此，全球范围的竞争压力促使制造业自动化水平进一步提高，从而使大部分产品的材料成本要占其总成本的50%甚至更多。

材料选用对于设计的关系。一种不正确的材料选择不仅会造成零件的损坏，而且会增加不必要的成本。为一个零件选择一种最佳材料的成本要比一种其使用性能仅仅够用的材料高很多，此外还需将这种选择与材料处理紧密地结合到成品零件中（见图1.3-2）。选用不适当的材料会增加制造成本和不必要的零件成本。还有，工艺（有利或有害地）也会改变材料的性能，而且还会影响零件的使用功能。

由于可供选择的材料与工艺之间可以有无数种搭配组合，所以只有通过简单化和系统化才能达到目的。设计工作要经历概念（方案）设计、形体（结构）设计到细节（参数）设计，设计工作依此顺序展开，其材料和工艺的选择也随之变得更加细致。

在概念设计阶段，基本上所有的材料和工艺都是很粗略的。在此阶段，阿希毕（Ashby）编制的材料选择方法和图表（参考文献[2]）是非常有用的。每一种概念设计只是在金属、塑料、陶瓷、复合材料或木料之间，即局限在很窄的材料组别之间做出决定，其所需要的性能数据的精度也是很低的。如果要选用一种新型的材料，就必须在概念设计阶段予以确定；因为在设计过程以后的那些阶段里需要做出的决定实在太多，所以届时难以再对其进行重大的变更。

在形体或结构设计阶段的重点是利用工程分析法确定零件的形状及其大概的尺寸。这时，设计者可以就材料的种类和工艺做出决定。例如，铝合金的种类，锻铝还是铸铝。必须在较高的精度级别上了解对材料的性能要求。

在细节或参数设计阶段，需要确定的只是限于个别的材料和一些制造工艺。此阶段的重点在于确定关键的公差，优化完善的设计以及利用工程质量和成本模型的方法选择最好的制造工艺，同时还需要根据零件的关键特性在更高的精度等级上了解材料的性能。作为极端情况还要求根据大范围的材料试验程序创建详尽的数据平台。

迪克逊和泼里（Dixon 和 Poli）经过对工程设计较为仔细的研究后，提出了材料选择的四步骤：

- *步骤1*：根据其关键特性，确定零件是用金属、塑料、陶瓷，还是复合材料制造。
- *步骤2*：作为金属零件，确定其是用成形工艺（锻压）还是铸造工艺来生产；作为塑料，则应确定其是热塑的还是热凝的凝结聚合物。
- *步骤3*：局限于材料大类别之间进行的筛选。金属可进一步分为碳钢、不锈钢、铜合金等类别。塑料则进一步分为特定类别的热塑性塑料和热凝性塑料，如碳酸聚酯和聚酯。
- *步骤4*：按照特定的级别或技术指标确定一种特定的金属。

可见材料和工艺的筛选过程也就是从一个较大范围的可能性逐步缩小到某种特定材料及工艺的渐进过程。步骤1和2作为概念设计一般是可以了。步骤3是形体（结构）设计所必需的，有时也可作为概念设计的一部分。步骤4则可被延续到细节（参数）设计的结束。

有一种在工程设计的各个阶段解决问题均可采用的方法叫做定向迭代法（*guided iteration*，参考文献[3]）。定向迭代过程的步骤就是将问题列为方程，求出迭代解，并评价迭代结果，如结果被否定，则按照评价的结论进行定向再设计。这个方法是设计过程的基础。在产品设计中，它要被重复成百上千遍。在实现设计方案的整个阶段里，该方法以循环的方式一遍又一遍地被用于筛选材料和工艺、结构化零件，以及最终确定尺寸和公差的数值。定向迭代法经概括如图1.3-3所示。

材料选用与制造之间的关系。材料的选用必须与制造工艺的选择紧密结合。由于生产同样的零件可以采用多种不同的工艺，所以这种选择并不是一件容易的事情。

选择材料和工艺的目标是达到最高的质量和最低的成本。图1.3-4所示是将制造工艺分解为九个主要板块。

从很一般的意义上说，材料的选择决定了将材料处理成为零件的工艺范围。表1.3-1表示了用于不同的金属和塑料最常用的制造方法（参考文献[4]）。材料的熔点、抗变形的一般能力（硬度）及其塑性也决定了材料的选择与制造之间的关系。下一个要考虑的

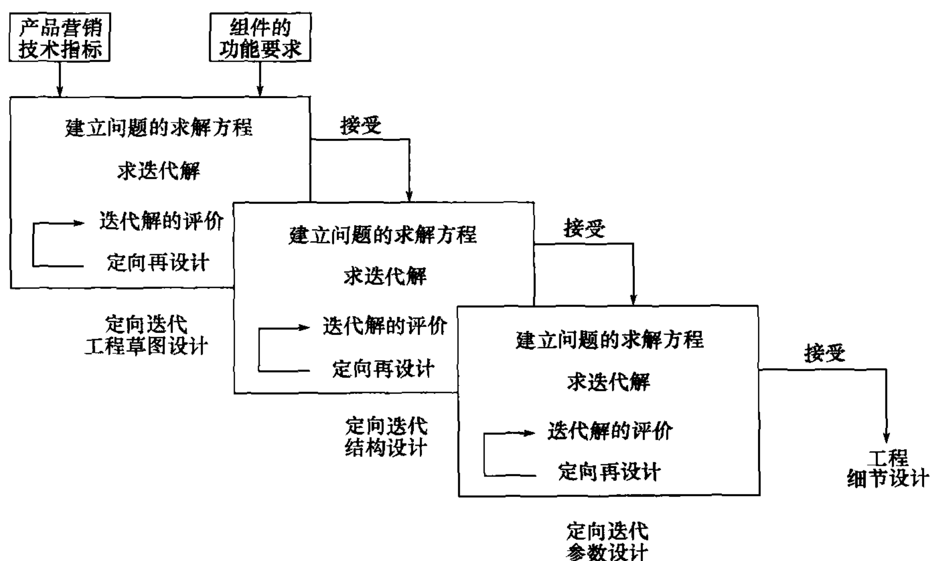


图 1.3-3 应用于草图、结构和参数设计的定向迭代法

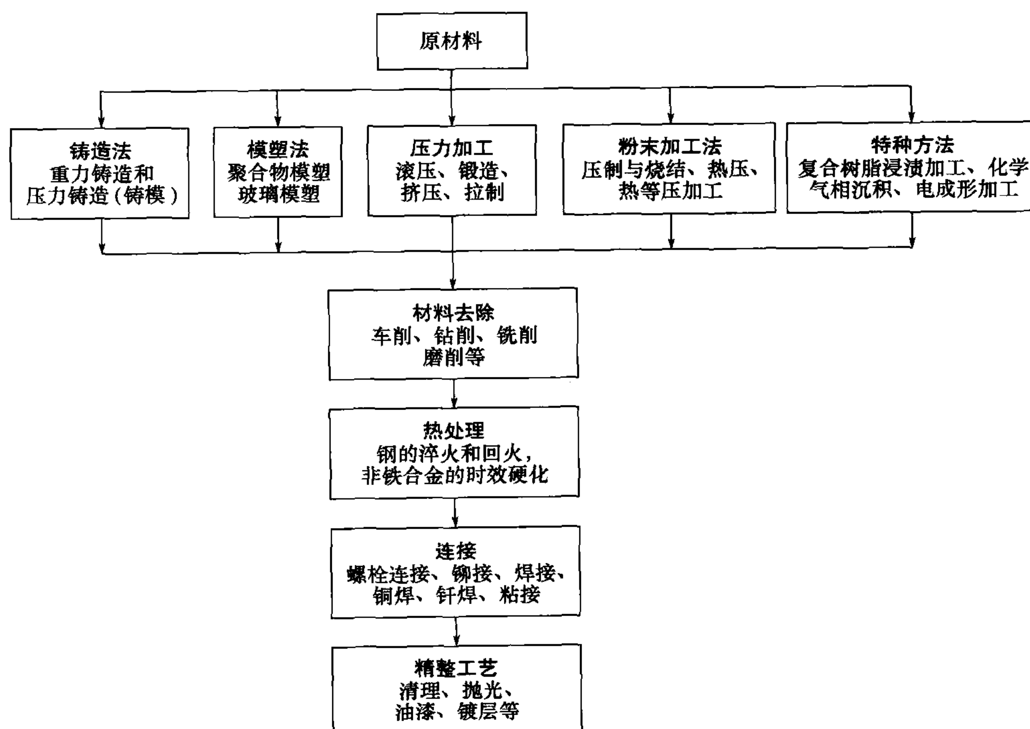


图 1.3-4 九类加工工艺。第一排包含的是初始型工艺。下面竖排的是二次成型或精整工艺

表 1.3-1 材料与制造工艺之间的兼容性

工艺 \ 材料	铸铁	碳钢	合金钢	不锈钢	铝及铝合金	铜及铜合金	锌及锌合金	镁及镁合金	钛及钛合金	镍及镍合金	难熔金属	热塑性塑料	热凝性塑料
铸造与模压													
砂型铸造	●	●	●	●	●	●	—	●	—	●	—	×	×
熔模铸造	—	●	●	●	●	●	—	—	—	●	—	×	×

（续）

工艺＼材料	铸铁	碳钢	合金钢	不锈钢	铝及铝合金	铜及铜合金	锌及锌合金	镁及镁合金	钛及钛合金	镍及镍合金	难熔金属	热塑性塑料	热凝性塑料
铸造与模压													
金属模铸造	×	×	×	×	●	—	●	●	×	×	×	×	×
注射模压	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●	×
发泡模压	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●	×
吹塑模压(挤压)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●	×
吹塑模压(注压)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●	×
旋转模压	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●	×
锻造/整体成形													
冲击挤压	×	●	●	—	●	●	●	—	×	×	×	×	×
冷镦	×	●	●	●	●	●	—	—	×	—	×	×	×
闭式模锻	×	●	●	●	●	●	×	●	●	—	—	×	×
冲压与烧结	×	●	●	●	●	●	×	●	—	●	●	×	×
热挤压	×	●	—	—	●	●	×	●	—	—	—	×	×
旋转模锻	×	●	●	●	●	—	—	●	●	●	●	×	×
切削加工													
毛坯切削	●	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	—	—
电化学加工	●	●	●	●	—	—	—	—	●	●	—	×	×
放电加工(EDM)	×	●	●	●	●	●	—	—	—	●	—	×	×
线切割	×	●	●	●	●	●	—	—	—	●	—	●	×
成形加工													
板金属成形	×	●	●	●	●	●	—	—	—	—	×	×	×
热成形	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	●	×
金属拉丝	×	●	—	●	●	●	●	—	—	—	—	×	×

● 可行；—不太可行；×不可行。（摘自参考文献[4]）

方面就是零件的最小和最大总体尺寸，通常表示为其体积、投影面积或重量。最大尺寸往往受设备条件的限制。形状则是另一个要考虑的因素，总的原则是选择一种使零件尽可能接近其最终形状(近终形的成形工艺)的初步工艺，而不要用昂贵的二次切削加工或磨削。有时候起始用的材料形状是很重要的。例如空心轴最好是用管料而不是实体棒料开始加工。形状常用长宽比、表面积体积比或板料宽厚比来表征。零件的复杂性是与其形状紧密相关的，它还与不对称性有关系。它也能用零件所包含的数据来衡量，即描述其形状时必须确认的自由度数量。公差就是零件相对于其理想尺寸所允许的偏离程度，与之密切相关的是表面粗糙度。表面粗糙度是用表面上凹凸幅度的方均根值来表述的。每一种制造工艺都具有使零件达到一定的公差和表面粗糙度范围要求的加工能力(图1.3-5)。

同步工程

材料选用及其工艺、产品设计、成本、有效性、再生性以及最终产品的功能，现在都变得越来越不可分割了。于是，越来越多的公司都组建多学科的项目组，以确保所有需要的投人都能同步进行。这可以从“同步”和“模拟”工程日益广泛的应用中得到反映(参考文献[6]、[7])。

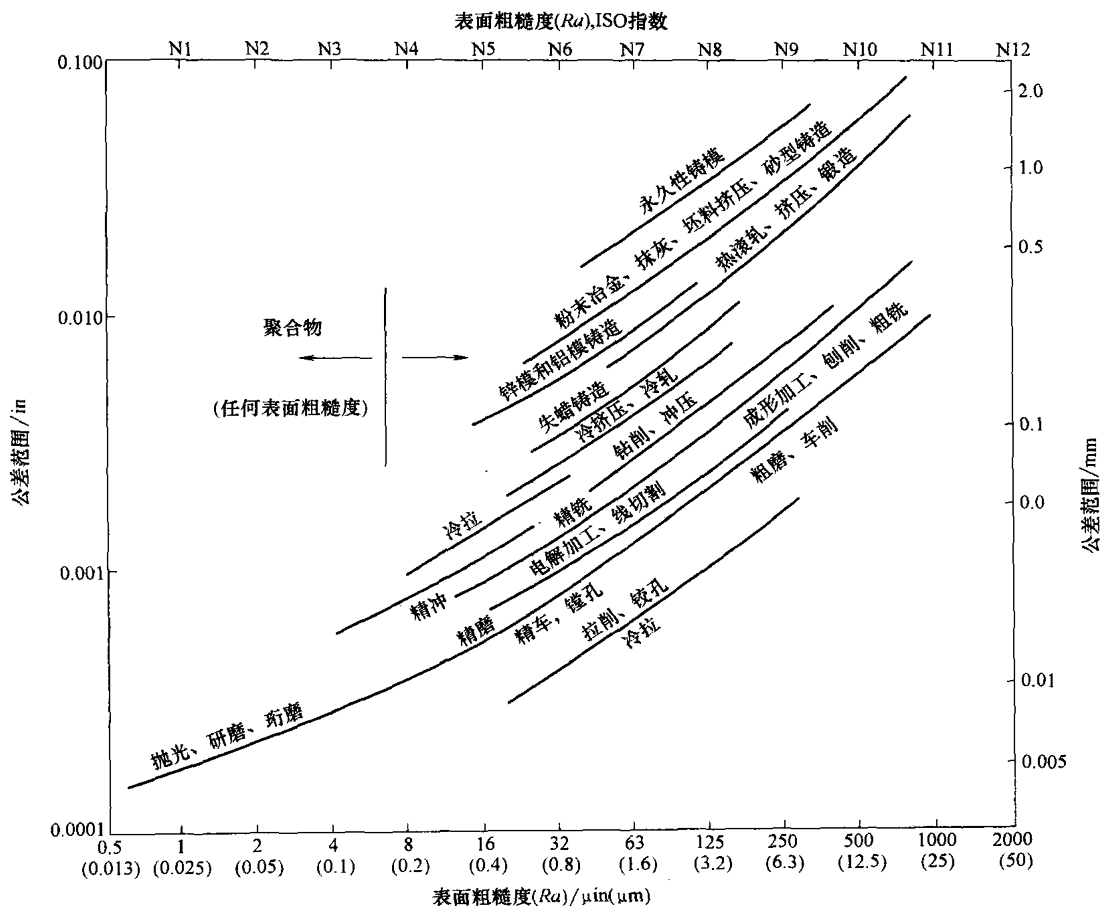


图1.3-5 从不同的制造工艺得到的典型表面粗糙度和尺寸公差的近似值。ECM(电化学切削加工)，EDM(电火花切削加工)。引自参考文献[5]

定义。根据国防分析研究所报告R-338(参考文献[6])的定义，所谓“同步工程”就是“产品及其工艺的一种包括制造及其支持在内的集成、同步的设计的系统化项目。这是要求开发人员从项目一开始就考虑产品从方案规划到报废处置的整个寿命周期的全部各种因素，包括质量、成本、进度和用户的要求”。因此，同步工程指的是创建一种协同的工程环境所需要的思维结构，从而以最低成本对质量和生产效率进行优化。

功能交叉的设计团队。如今是由共同目标、联系密切、功能交叉且经过集约的产品开发团队来承担进行同步设计的。为将失误降至最低以及缩短开发周期和减少成本，数据和信息的交流是至关重要的。作为各项工作计划的首要任务就是应该由在筛选材料、工艺和产品方面都富有资历、经验和基础知识的人员组成一个理想的小组。最有成效的设计小组还应当包含一批思路清晰的规划人员，他们将为所确定的产品从开发一直到进入市场而全力以赴地进行工作。这个小组不仅应由资深的研究和开发人员组成，而且还要让制造和市场营销人员参加进来，通常还需要质量、财务和现场服务等方面的人员介入。当发现小组在知识构成方面还存在若干空缺时，则需要部分地借助外部的信息和知识来源(如从关键的供应商处)，并且形成其自身的新技术资料。随后，对于小组来说，在其内部或与外部的信息传递是非常重要的。参考文献[8]~[10]为功能交叉设计团队的人员配置以及让他们在现代设计实践和方法方面的充分发挥提供更为详尽的信息。

材料处理的同步工程计划(参考文献[7])。图1.3-6出示了在材料、工艺和产品工程方面成功地实施同步工程所必须遵循的一些原则(以铝合金制造为例)。其左侧两列所示为典型的客户需求，图示上面所列的是一些典型的加工方法。图表中编列的这类常被执行的特定工艺流程只是作为一种演示。工艺细化和工艺控制是指对一套制造能力有限的具体工艺流程所作的一些改进。而单一工艺的优化是指对特定工艺

客户需求		工艺经历											
		合金	铸造	消除应力	均质化	热加工	退火	冷加工	热处理	表面处理	去毛刺	整形	应用
成型													
	尺寸	最终形状				工艺控制							
	公差												
结构	晶粒												
	组织				合金工艺设计								
	错位												
	颗粒												
	空隙												
残余应力													
	宏观												
	微观												
								单一工艺优化					
表面	化学												
	粗糙度					工艺精细化							
	方向性												
	缺陷												
成本													
		成本估算											

图 1.3-6 铝合金制造的同步工程矩阵图。引自参考文献[7]

操作中许多方面所作的更为具体的改进。合金工艺设计则是指对工艺流程的排序进行检查，其关注的只是限于所涉及产品的某些特定属性，在上述例子中就是指其显微组织形成的属性。“近终形状”的工艺流程就是为了降低成本而减少工序的一个有代表性的例子。用成本估算处理特定的工艺流程可望用于实现所要求的产品的属性。

上面所介绍方法中，有一些要求有经验数据(如成本估算法)，另一些要求经过试验(如合金流程设计)，还有一些则要求以模型为基础(如工艺控制)。依此必须在同步工程中处理具有不同形式的信息，以便最大限度地在次一层的小组或个体成员之间传递信息。提高信息传递的数量、质量和速度是非常重要的，因为它可以提高团队在图 1.3-6 所示的设计空间里进行沟通和运作的效能。然而数据传递的本身却不能增加小组的设计、优化或逆向工程的能力。工艺模块化和计算机模拟法可以提供这种适用性。

参考文献

[1] M.M. Farag, *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design*, Prentice Hall, London, 1989.

[2] M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, 1992.

[3] J.R. Dixon and C. Poli, *Engineering Design and Design for Manufacturing*, Field Stone Publishers, 1995.

[4] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly*, Marcel Dekker, 1994.

[5] J.A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill, 1987.

[6] S.N. Dwivedi, A.J. Paul, and F.R. Dax, Ed., *Concurrent Engineering Approach to Materials Processing*, TMS/AIME, 1992.

[7] L.A. Lalli, Concurrent Engineering—Simulation Challenges in the Design of Materials, Products, and Processes, *Concurrent Engineering Approach to Materials Processing*, S.M. Dwivedi, A.J. Paul, and F.R. Dax, Ed., TMS/AIME, 1992.

[8] P.G. Smith, Cross-Functional Design Teams, *Materials*

Selection and Design, Vol 20, ASM Handbook, ASM International, 1997, p 49–53.
[9] J.R. Katzenbach and D.L. Smith, *The Wisdom of Teams*, Harper Business, 1993.
[10] G.M. Parker, *Cross-Functional Teams*, Jossey-Bass, 1994.

精选参考文献

- M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, 1992.
- R. Bakerjian, Ed., *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Vol 6, *Design for Manufacturability*, 4th ed., Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- J.A. Charles and F.A.A. Crane, *Selection and Use of Engineering Materials*, 2nd ed., Butterworths, 1989.
- N. Cross, *Engineering Design Methods*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1994.
- G.E. Dieter, *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1991.
- J.R. Dixon and C. Poli, *Engineering Design and Design for Manufacturing*, Field Stone Publishing, 1995.
- M.M. Farag, *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design*, Prentice Hall, 1989.
- G. Lewis, *Selection of Engineering Materials*, Prentice Hall, 1990.
- G.T. Murray, Ed., *Handbook of Materials Selection for Engineering Applications*, Marcel Dekker, 1997.
- National Research Council, *Improving Engineering Design: Designing for Competitive Advantage*, National Academy Press, 1991.
- G. Pahl and W. Beitz, *Engineering Design*, K. Wallace, Ed., The Design Council, 1984.
- S. Pugh, *Total Design: Integrating Methods for Successful Product Engineering*, Addison-Wesley, 1991.
- H.E. Trucks, *Designing for Economical Production*, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, 1987.

第2节 设 计 要 素

将本章所叙述的设计要素人为地归纳为三大类：功能要求、全寿命周期分析和其他主要要素，分别列于表1.3-2～表1.3-4。这些分类之间相互交叉和重叠，并且构成了工程设计的主要挑战。

设计的基本要求

性能指标

显然任何一种设计都一定要满足其各种性能指标（表1.3-1）。而这些指标必须反映产品所要求功能的全面且完整的分析。有必要在表征产品基本功能要求的性能技术指标与一系列结构、公差、材料和制造方法等的产品技术指标之间进行重要的区分。性能技术指标是代表将设计公式化的一些基本参数，而产品技术指标指的是一种用于购置或制造产品的设计规范。没有完整和适当的性能技术指标就不可能得到优良的设计或产品技术指标。

性能技术指标必须反映列于表1.3-2和表1.3-3里的设计要素的所有各种依据。在确立性能技术指标的过程中，必须考虑到由于预期的产品使用不当或过载，或者因为人员或材料的不适合而导致的产品失效，以及由此造成的后果及风险（见“风险和危害性分析”一节里的论述）。是否使用严格的性能技术指标将取决于产品的工况条件，即产品的失效是否会造成惨重的后果或仅有极低的风险。当产品的失效并不

表1.3-2 设计的基本要求

性能技术指标	价值分析
阐明需求	候选的材料和制造工艺
技术指标范围内存在的风险和后果	制造和装配的设计（DFMA）
超出技术指标的后果	质量设计
风险和危害性分析	强劲设计（田口玄一（Taguchi）法）
失效模式和后果分析（FMEA）	统计过程控制（SPC）
安全性分析	全面质量管理（TQM）
设计流程/形态	可靠性设计
概率的或确定性的统计分析	定量测算
应力和载荷依据	可靠性试验
尺寸、重量和体积限制	再设计
使用中的危害性，如交变载荷或侵蚀性环境	设计审核
失效预期	简洁化和标准化
可靠性、维护性、可用性和可修理性	功能替代
可达到的生产量	

表 1.3-3 设计中的总体寿命周期

材料选择
可生产性
耐用度
回收的可行性
回收设计
能耗要求
　生产
　使用
　回收
环境兼容性
　产品对环境的影响
　环境对产品的影响
检验和质量保证试验
搬运
包装
运输和储存
废料价值

表 1.3-4 设计中的其他主要要素

技术背景
　前期知识
　侵权的可能性
　产品兼容性
设计法规和标准
　特种产品的法规，如压力容器
　安全要求
　　产品——消费者产品安全委员会
　　　警告
　　　使用注意事项
　　　标签
　　制造——职业安全和健康管理部门
环境要求——环境保护机构
工业标准
　ANSI
　ASTM
　SAE
　UL
　ISO
人体要素/人机工程学
　便于操作
　容易维护
美学
成本

会涉及人员遭受伤害或给用户造成很大的经济损失的风险时，作为经济方面的考虑通常意味着对其性能技术指标的严格性无需超越为满足其功能所要求的标准。具有实用意义的性能技术指标是旨在使设计和制造能让产品以较小的风险发挥所要求的功能，同时尽可能使它以最低的成本进行生产。

举一个通过确定性能技术指标来适合其应用的例子，耐腐蚀性可以规定以下三个等级：①避免因产品腐蚀而造成污染；②防止密闭容器的内泄漏或外泄漏；③尽管有腐蚀存在，但仍能保持结构的完整以及其他机械和物理性质。对于处理食品的设备，①是最重要的。对于一座桥梁，③是关键的，因为桥梁必须保持其很多年的结构完整性。对于石化工厂，①②③都是很重要的，化学工艺设备可以设计成连续运行两年或三年，在其维修周期内的停产损失是极其严重的，而且危险的化学物质从其设备中泄漏更是不允许的。为此，由泄漏的导致停产和设备损坏，以及由此所造成的损失是可以通过采用昂贵的材料予以抵消的，只要该材料的性能可以把产生泄漏或破坏的可能性降到非常低。作为汽车车身，低碳钢经表面防腐和涂层处理便可以获得与汽车的期望寿命相称的耐腐蚀能力。于是对于这些不同的用途，适合的防腐蚀指标有赖于以下一个或多个的因素：该用途所能容忍的腐蚀程度、所要求的目标寿命、环境的腐蚀特征以及与腐蚀失效相关的后果和风险。

实例1：汽车排气管系统的功能需求。作为排气系统的产品设计指标必须包括以下功能：

- 将发动机废气从发动机里排出。
- 防止有害烟雾进入汽车。
- 冷却排出气体。
- 减少发动机噪声。
- 减少车身零件暴露在废气中。
- 尽可能降低对发动机性能的影响。
- 帮助控制不应有的废气排放，有足够长的使用寿命。
- 有一个合理的成本，包括其初始器件和维修配件。

基本配置的排气系统是由在汽车里收集废气，并将其从汽车的尾部排放出去的一系列管子所组成。管子的大小是由被排放的废气体积和废气气流从发动机排出过程中在排气系统内受到阻碍的允许程度所决定的。作为附加装置，消声器用于减少噪声，催化转化器用于将污染的气体转化为危害性较少的排放。它的基本寿命要求就是系统必须能够在一定的时期里抵御热且潮的废气的侵蚀。此外，系统还要能抵御大气、

水、泥浆和路盐的侵蚀。排气系统在汽车下面的位置，要求将它设计成一种复杂的形状，这样它不会与汽车的齿轮箱、路面间隙和车厢发生干涉。每年所生产的大量汽车要求排气系统能以最低的成本进行生产。

该系统有许多材料性能的要求。其力学性能的要求不算太高：适当的刚性能防止过度的震动和疲劳，再加上足够的抗蠕变能力就可以得到适当的使用寿命。腐蚀是寿命的制约因素，尤其在其冷端，包括共振器、消声器和尾管。在该系统里存在着一种效用的多种性质，即在材料选择上只有一种或两种性质起支配作用。这些性质都与铂基催化剂以及装载催化剂的陶瓷容器有关。多年来，构成排气系统的大多数管子和容器都是用低碳钢通过成形和焊接制造而成的，还要经过适当的涂层用于防腐。随着对汽车的质量和长寿命提出的更高企求，材料的选用已转向开发进一步防腐和抗蠕变性能有进一步提高的专用不锈钢。w(Cr)为11%的铁素体合金用于冷端的元件，而w(Cr)为17%~20%的铁素体合金和Cr-Ni奥氏体合金则用于系统的热端。

风险和危害性分析

正如上面所概述的，产品失效及与之相关的伤及人员的风险是设计过程中最为重要的依据。100%安全或零差错的系统/元件是不存在的。风险和危害性分析的目标是要确定风险的水平，并且为系统中代表最大失效风险的那些零件进行定位。于是如果分析得当，就可以采取步骤消除事故的根源，并将风险降低到可以接受的最低限度。已有人提出如果能在全方位采取措施就可以使硬件系统达到一个“无失效”的工况条件，这些措施主基于以下各项考虑：

- 关注以往类似系统里的经验。
- 所有项目人员都能得到风险信息。
- 在所有各阶段都要进行噪声、侵蚀的风险和危害性分析。
- 在上述分析基础上提出适当的对策和安全计划。
- 在项目进程的所有各阶段都要进行连续和严密的审查。

通过对系统可靠性的研究已经开发了不同的分析技术。接下来的研究都是指向硬件的，其重点在于使硬件能发挥其应有的功能。

图1.3-7所示的流程图描述了对整个设计过程中的风险和危害性的整体分析。即使设计者或设计经理不直接负责进行这些分析，他们也只有熟悉这些分析的方法才能懂得如何处置及应对设计或系统变化方面的问题。最好在设计初期就能努力完成这项工作，以便在设计审核阶段能有效地予以利用，并为设计提供有价值的反馈，以避免将来发生失效。

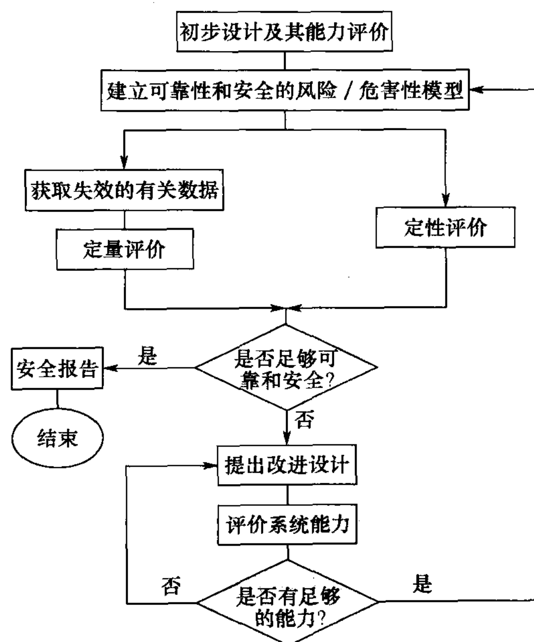


图1.3-7 将风险和危害性分析整合入设计过程的流程图。摘自参考文献[1]

定义风险。为了确认可接受的风险，斯达尔等人（参考文献[2]）认为确认以下四种不同的“风险”定义将是有用的：

- 由实际情况所确认的*真风险*，并为未来所展现。
- 以现有的数据确认的*统计风险*，基于假设：从平均上看，大量的未来系统将会以与大量的过去类似系统相同的方式起作用。
- *预期风险*，是以系统、模型和历史的数据为基础得到的。
- *意识风险*，由一些个人或组织凭直觉所意识到的风险。

应该指出的是只有“真风险”才具有硬件特性，而其余三种则代表了系统所蕴含的风险概念。

如果真的发生事故，作为风险认知的一个重要因素就是其后果的概率严重度。对风险的全面评价将要求将事故的潜在影响与其发生的概率相整合。

在风险认知中与后果严重度紧密联系的是其后果的偶发特性。潜在事故的大小似乎远比其发生的概率重要。这确实也在很大程度上代表了社会的价值体系。因此，能够发生恶性事故的活动被看成是一种很大的风险，必须比那些高频率发生的单个风险给予更

为严格地控制。

本章后面介绍的两种方法可以确认可能存在的危害性，也许还能确定为规避或降低风险所必要的对策；然而，是否应当使用这种对策来减轻认知风险，目前仍然是一种政治-人道-管理方面的判别。通过技术研究来承担这种风险和危害性的合理性就在于其作为一种判别能更清楚地表明一定确保设计的功能性要求得到满足。对于风险和危害性的定性和定量分析的更为详细的内容可以参阅参考文献[3]以及本文中“设计中人的因素及其安全考虑”。

失效模式和后果分析(FMEA)。本来这是作为审查系统或元件可靠性的一种工具而开发的。经过多年的改进，它现已包括临界状态分析(CrA)和失效危害性分析(FHA)，以帮助确定设备的安全性要求。FMEA的目标仍然是确保系统功能的可靠性，它的目的是揭示所有失效模式的隐患元并进行仔细的分析，对其发生的可能原因及与之相关的发生概率进行分类和量化，以及根据其对整个系统功能所产生的影响做出评估。

失效模式和后果分析通常作为可靠性综合程序的一部分来执行的。由于分析是随着设计进程中复杂性的不断增加而展开的，故以上述分析为依据而拟定的措施可以得到及早的实施并使其成本为最低。其结果还可以被用于指导其他各项工作，如设计、采购、制造和质量控制。

失效模式和后果分析也是对整个系统运行的潜在失效进行测试、评估和分析的一种有系统、有组织的步骤，它被用于作为其他可靠性和安全措施的补充和支持。FMEA过程包括检查每一种失效模式，评价各单元系统是否支持其可靠性，并确认该失效对于整个系统所产生的后果。它的一般过程包含如下步骤：

1. 对系统潜在的失效模式进行确认、评估、评价，并形成文件。

2. 利用可能失效模式文件检查和验证设计的安全性。

3. 简明地制订出纠正措施，以便将失效所造成的后果消除或减轻到一个可以接受的水平上。

编制一个FMEA的正式程序(见图1.3-8)由下列步骤构成：

1. 将系统及其子系统绘制成功能性的框图或逻辑图。这些图将成为FMEA文件的一部分。再把被考虑的条目逐条编号。

2. 逐一设定框图里的每一元素所有实际可能失效的模式，并编写进FMEA的文件里。

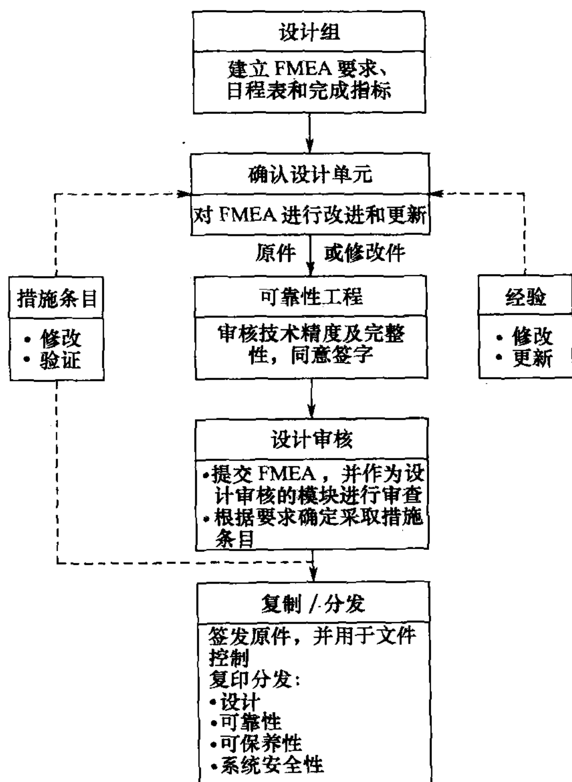


图1.3-8　失效模式和后果分析流程图。引自参考文献[4]

3. 将与每一个失效模式相关联的可能原因列于失效模式的旁边。

4. 描述由各种设定的失效所引起的直接后果并将其列于失效模式的旁边。影响其功能的症状也列在一起。

5. 所有作为系统内补救的预防措施，包括为了消除或减缓失效所造成的影响，都要进行评估和注明。

6. 失效对其他系统或元件所造成的影响也要进行评估，并写入文件里。

7. 每种失效模式的严重程度等级都要按照其重要性进行评估，并在文件里标为严重、一般和轻微。

8. 对失效模式发生的概率要进行量化。可能的话，这个概率要用数值来表示(参考文献[5])。在某些情况里如果采用通用的等级规定，那么按级分类是比较有意义的。

9. 最后，还要在文件里写上备注和建议。如上分析提供了各种有附加意义的数据。

安全分析。这是其他各种风险和危害性分析方法的综合，进行一种贯穿在项目的设计、开发和实施的各个阶段的、以预防事故为目标的定性和系统的分析。这也包括预防人身事故、设备损坏等。所用的方

法是简单却又严密且颇费时间的；必须在系统的整个寿命从规划到停产维修和报废处置都要持续坚持，才能取得成效。方法可用于任何系统，但以不同的观点来看还不属于系统分析。安全分析的目标是防止发生危害性的失效。

作为安全分析的基本工具有工作单、险情登记簿、险情检查清单和系统描述。专业人员的一个基本要求就是愿意向现状挑战，他们不能像一般人仅满足于硬件系统的设计和实施。

险情的识别是一项首先要不断坚持的工作。识别起始于一个迭代过程——初始险情分析法(图1.3-9)，它可将主要的险情消除或减轻到可以接受的最低限度。设计更改、安全装置、报警系统、人员操作规程、紧急措施等都作为推荐使用的方法。通过实施这些方法就可以控制和对付危急形势。为此常要求在设计者和安全分析人员之间进行折中，甚至要对制约其功能的技术参数或系统的应用范围进行修改。完成初始险情的分析应该：

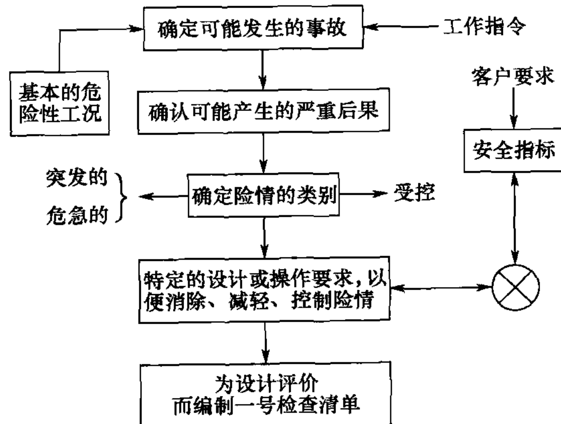


图1.3-9 作为险情初步分析的安全分析流程图。引自参考文献[6]

- 识别所关注的一般性险情。
- 提出附加的设计和操作要求，以预防和减轻预期的险情。
- 对于有必要作进一步改进的部位要一一进行确认。
- 建立数据库，以便将其用于跟踪潜在的险情工况，并将其记录在案。

因为十全十美的系统是不存在的，所以安全分析要贯彻在整个硬件的设计和生产过程中。安全分析还要包括在此后操作阶段的险情分析(OHA)(图1.3-10)。这有助于制定一些针对操作者有可能发生的失误而应采取的措施。进行OHA的方法除了必须考虑作为人的操作者及其局限性外，其他都与系统的险情分析是一样进行。OHA的输出就是操作上的要求，也就是对于人局限性的补偿和纠正。采取的步骤不是防止险情的发生，就是限制其影响和将其降低到最低程度。

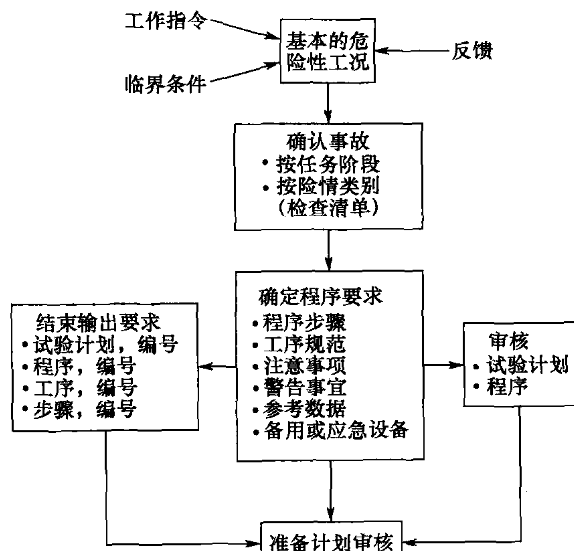


图1.3-10 作为操作危险性分析的安全分析流程图。引自参考文献[6]

作为OHA的输出形式可以是操作步骤、工艺规范、注意事项或警示、参考数据、备用或应急设备。

设计过程

设计过程包括确定产品和各种元器件的结构形态，选择将要使用的材料和工艺。在此初期阶段，这个过程是对其初步的结构形态、拟采用的材料和考虑使用的制造方法的不同匹配组合进行评估，并且将其与先期已确定的性能指标进行比较。结构形态与材料(经过一定方式的处理)之间的关系就是每一种结构形态对材料的特定要求，即材料具有满足这些要求的能力。其中一个共同性的特定关系就是由结构所赋予的应力跟材料强度之间的关系。当然，也还有一些其他的关系存在。工艺的变化能够改变材料的性能，但有些制造工艺并不能实现结构形态与材料两者的特定组合。

概率性或确定性分析。结构形态要求与材料性能之间的量化关系可以用确定性的方法确立，该方法也就是为大家所熟知的概率统计法。借此，其应力、尺寸和强度的名义值或平均值都可以用于设计计算中，适当的安全系数可以补偿这些参数预期的变化和材料的不均匀性。在概率分析中，每一种设计参数都符合一定的数值统计分布。通过这些统计分布和失效概率

的允许极限值，就可以计算出关键部位允许的尺寸值（或关键元器件的最小强度）。与确定性相比，概率性分析对于设计者来说要求具有更高的技巧，并需要较为繁琐的计算，但是对于众多用料较少的紧凑型零件来说，它更具潜力。应用概率法的一个明显缺点就是性能的统计分布并非广泛适用，常要求在这些方法应用于特定的设计任务以前，就必须能确定这些性能的统计分布。

在任意一种的设计分析里都必须要考虑到凹槽的影响和应力集中，因为这种特征会增加所有各种零件发生失效的脆弱性。然而，断裂力学的研究也表明，某些设计应用在一定的条件下，其凹槽和材料的不均匀性也许是有益的，因此不会产生什么后果的。在“设计的统计学特性”一节里将更详细地描述统计方法在预测如运行应力、应变、偏移、变形、磨损率、疲劳强度、蠕变强度或使用寿命等有关参数方面的应用。

应用险情的影响。在材料选择的过程中，必须考虑到交变载荷、极端严酷的温度以及存在着会引起一般性腐蚀或应力腐蚀开裂的介质等一些特别的危害性。表1.3-5列出了一些普通的失效模式以及与该特定模式最为相关的力学性能。交变载荷，尤其对于设计任何有运动的零件来说是一个非常普遍的因素，而且基本上会认为在所有的应用失效中，大部分都是因为疲劳所致。1943年奥尔曼（参考文献[7]）曾对疲劳作过一个至今仍为有效的观测，即：

“在实际应用或者实验室和道路的试验过程中，所发生的全部疲劳失效中的90%可以追溯到在设计和生产时遗留下的缺陷，而只有剩下的10%基本上是由冶金方面的原因而在材料、材料技术指标或热处理中生成的瑕疵所造成的。

研究材料的疲劳是冶金、工程和生产部门的共同职责。在引起疲劳的机械和冶金方面的因素之间没有一条绝对的界限。这种缘由之间的重叠至今仍未得到充分的了解。

因此，工程师们总是祈求用冶金方面出现的新奇迹来弥补他们自己的过错。冶金工作者也少有意愿去探索发生疲劳的冶金方面的原因而坚持大家都要对所造成的机械方面的原因共同进行力所能及的调查，故在此之前我们对于工程材料的充分利用不能寄以太高的期望。”

尽管奥尔曼只是专门谈到疲劳问题，但是他的意见可以推而广之地应用于工程设计。他的意见也一定不要理解为是在让材料工程师推卸其在整个设计中应尽的那部分责任，也更不是要他们减少为一些特殊用途去发现更好的材料所付的努力。

奥尔曼的意见确实意味着设计的方方面面的问题都必须予以考虑，因为即使一些很不起眼的因素，也会产生难以估量的影响（至少这里有一个为大家所熟知的例子，飞机在飞行过程中发生疲劳失效的原因竟然会追溯到一个检验印记，因为当时给零件上打印时落锤太重了）。

表1.3-5　失效模式与材料性能之间的关系

失效模式	材料性能														
	抗拉强度	屈服强度	压缩屈服强度	剪切屈服强度	疲劳特性	塑性	冲击能	相变温度	弹性模量	蠕变率	K_{Ic}①	K_{Iscc}②	电化学势	硬度	膨胀系数
严重屈服		×		×											
翘曲			×						×						
蠕变										×					
脆性断裂							×	×			×				
低频疲劳					×	×									
高频疲劳	×				×										
接触疲劳			×												
微动磨损			×										×		
腐蚀													×		
应力腐蚀开裂	×											×	×		
电腐蚀													×		

（续）

失效模式	材料性能														
	抗拉强度	屈服强度	压缩屈服强度	剪切屈服强度	疲劳特性	塑性	冲击能	相变温度	弹性模量	蠕变率	K_{Ic}①	K_{Iscc}②	电化学势	硬度	膨胀系数
氢脆	×														
磨损														×	
热疲劳										×					×
腐蚀疲劳					×								×		

在材料性能与失效模式交叉格里的×代表特定的材料性能对于控制特定失效模式是有影响力的。

①平面-应变断裂韧度。　②产生应力腐蚀开裂的临界应力强度。

失效的预测。即使对于实际应用时的载荷已经有了十分精确的了解，且其应力分析也是十分直观，然而仅仅依赖以抗拉强度和屈服强度为主的静态承载能力还是有可能造成总体设计上的缺陷。如疲劳、应力腐蚀开裂、有冲击载荷引起的脆性断裂等其他失效模式的可能性都必须在设计过程中有所考虑。

对于应用时潜在失效的讨论还应该包括对于可能发生的失效后果的深入分析。必须避免那些会对生命或肢体造成危害、或使装置的其他元器件遭到损坏的失效模式。有时可以把一台设备设计成使其某个元器件只能以一种相对不易产生危害的方式发生损坏，这样可以防止其他元器件因此产生更为严重的潜在后果。例如，一台地面搬运设备往往设计成一旦操作工试图举载过重而造成设备翻倒或损害任何主要元器件时，其发动机就会立即停机。压力容器里的熔断栓就是又一个例子。按表1.3-4所列的法规和标准就能排除因应用不当而造成的严重后果，但是设计人员还是必须通过对可能会发生的失效模式后果的研究（和针对性设计）来对此进行仔细的判别。

尺寸、重量和体积的限制。零件的尺寸、重量和体积会影响材料与制造工艺的选择。小零件常用实心棒料作为毛坯进行切削加工，即便需加工的零件数量相当大，也是这样比较经济。假定相对较贵的材料也能使用，小零件的材料成本则远小于制造它的成本，大零件通过热处理达到高强度要求是很困难的，甚至是不可能的。采用不同制造方法加工成形零件还有一些尺寸方面的限制。压模铸造、熔模铸造和粉末冶金只能限于制造几千克重的零件。以重量为关键因素的零件常要用高重量-强度比的材料来制作。

需要加工零件的数量会影响工程设计过程的各个方面。作为小批量的生产运作，投资如锻造和压铸等生产工艺所需要的工装是不合算的，而且往往将限于在设计者工厂已经有的材料中或供应中心库存的材料中进行选择。大批量的生产运作则受到材料生产商能否根据需求供货的影响。特大批量生产的零件有时要被反复设计，以致在工程上和评估上需要很大的费用，但是还是会有足够的效益，因此考虑其批量之大，所付的努力还是很值得的。对于小批量零件的设计，则谋求能满足其使用要求的首次设计和首选材料的成功。

影响设计过程的其他相互关联性。能在若干个地点都可以制造的产品对设计者来说会遇到另外的一些问题，因为材料的成本及其是否便于得到都是因地而异的。例如，一个要在不同的国家里制造的产品，即便使用最为相当牌号的钢材还是有可能因所用材料间的差异而影响其使用性能。有些地区的普通劳动力成本很低，这就要求设计劳动密集型产品；然而针对高劳动力成本的市场，设计人员常要努力设计出能适应自动化制造设备性能的产品。

以前只有在设计过程的后期，设计者、材料工程师和制造工程师才能通过共同努力建立起如后面“材料选用的要素”一节中所描述的那些要素（如前文表1.3-2所提及的）。因为此时才能在一个可操作的选择数量范围里选择材料及其制造工艺。也只有在此时才能对材料和制造工艺的每一种选项的利弊进行评估，并据此对产品结构进行必要的更改。

材料选择中的复杂因素之一就是所有的材料性能包括其加工性最终都是相互关联的。用一种材料替代另一种材料或为了改变特定性能而对工艺进行某一方面的变更，一般都要同时影响其他性能。在不同的力学、物理性能以及与制造工艺有关的变量中存在着类似的更加难以表征的关联性，而且这种关联性还随制造工艺的改变而改变。例如，冷拉钢丝可增加其强度，但同时增加其电阻。为得到高淬透性和高强度而采用高碳和高合金含量的钢材，是难以进行切削加工和焊接的。加入一些合金元素（如铅）可以提高切削

性能，但是一般会降低疲劳强度寿命，还会使焊接和冷锻变得更为困难。此类相互关联性的例子几乎不胜枚举。

价值分析。即所谓的价值工程，它作为一种解决问题方法，专门用于对设计中一种或多种的关键性功能进行辨别，以此来剔除成本中那些不必要的部分，同时又不至于影响设计质量。在价值分析的过程中，必须按照以下基本原则进行审查：

- 功能是否确属必要？
- 功能是否超出其所求？
- 其成本是否超出其所值？
- 是否有其他方法能更好地实现该功能？
- 是否有成本更低的方法来实现该功能？
- 是否有某种标准可依？
- 考虑到批量的大小，能否使用工装成本较低的方法？
- 其价值是否超过合理的劳务费、各项支出费用、材料费和利润的总和？
- 是否还有其他的制造商能够以更低廉的成本提供，而不影响其可靠程度？
- 如果产品是为个人所购买的，是否会嫌贵？

使用上述原则的价值分析就能使设计和管理人员确保产品的结构、材料和制造工艺最终成为一种良好的组合。对此更详细的内容请参阅参考文献[8]。

出于制造和装配考虑的设计

随着人们日益加深对设计和制造之间相互关联的重要性的认识，已形成了一个将这种关联程式化的新领域，称之为“设计制造和装配”（design for manufacture and assembly, DFMA）。DFMA分析就是利用一种集成产品及其工艺的方法对产品设计的各个方面进行审查，这种集成方法能在产品和工艺要求之间得到最好的匹配，并且从根本上保证制造的顺利进行。DFMA的一个主要目标也是保证产品（包括材料选用）和工艺一起进行设计。

图1.3-11概括了在设计过程中所采用DFMA的步骤。首先进行装配设计分析（design for assembly, DFA），这是为了使产品的结构简单化。然后通过对零件的原有设计和新设计的早期成本估算，对两者进行权衡并做出综合性决定。在这个过程中，为不同的零件考虑使用最好的材料和工艺。例如用塑料或板料制造一个罩壳是不是更好？一旦材料和工艺被最后选定，就要对零件的细节设计进行更为全面的制造设计分析（design for manufacture, DFM）。

减少单个零件的数量是DFA为简化产品而提供

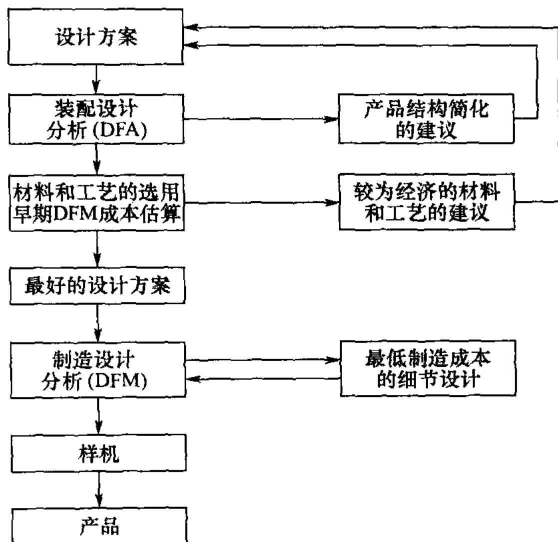


图1.3-11 在设计中采用制造和装配的设计分析的典型步骤

的最佳改进方法（参考文献[10]）。为了给减少零件数量提供指导原则，在装配过程中，DFA软件给每一个加上去的零件提出下列问题：

- 该零件或部件是否仅用于固定其他部分或确保其安全？
- 该零件或部件是否仅用于连接其他部分？

如果对以上问题的回答都是“是”，那从理论上考虑该零件或部件应该是不必要的。如果回答是“不”，则应当考虑下面重要的问题：

- 当产品运行时，该零、部件与其他所有已装配的零件之间是否存在相对运动？
- 该零、部件是否必须用与所有已装配零件所不同的材料来制造，或者必须与它们相绝缘？如答案为“是”，则必须能提出与材料性质有关的根本性的理由，其结论才能被认可。
- 该零、部件是否必须与所有已装配零件分隔开，否则就无法将后者进行必要的装配和拆卸。

如果以上三个关键问题的答案均为“否”，那么从理论上考虑该零件或部件应该是不必要的。

进行DFM分析有助于零件成本的量化，并对设计方案与材料及工艺的选择做出综合性的决定。当采用下列措施时，就能取得显著的成本效益：

- 对产品、部件、元器件、模块和单个零件的设计进行标准化；
- 使用已经过处理的材料；
- 让产品的设计开发去适应特定的制造工艺，即该工艺将适合于制造其零件；

- 每一个零件都应设计成易于制造的；
- 规避一些本身昂贵的加工方法。

当然，工程设计人员不仅要设计能经济地制造和装配的产品，还必须使其具有所要求的功能。这就要求对产品借以运行的结构原理进行筛选和深入了解。更进一步，适当的功能还需对公差予以特别关注。这就是所谓的功能与配合的两种设计考量。然而设计者还有许许多多其他问题需要考虑：安装、维护、运行、环境、报废处置、产品寿命、可靠性、安全及其他方面的问题。“X 的设计考量”（DFX）指的就是这些其他问题（参考文献[11]）。

DFM、DFA、零件最少化、功能、配合和 DFX 还不是工程设计人员所应当考虑的全部问题。产品的设计还应考虑到市场和利润，这也是客户和市场的规律。因此，设计人员需要懂得客户所要求的特点，以及被客户认为合格的产品。此外，市场考虑还应包括成本、质量，还有日益重要的时间，即产品应当何时推向市场。

设计者还应该认识到产品及其零件的制造工艺和使用条件是可变的。就像在“质量设计”一节中所讨论的，在这些可变条件下的经久耐用是产品的另一个设计要求。

质量设计

强劲设计。随意变化是制造的敌人。造成不必要的制造成本、产品的不可靠性，甚至最终导致客户的不满意和丧失市场份额的一个主要原因就是低劣的质量。因此，人们已经认识到为提高质量，最重要的莫过于减少随意变化和对付各种难以控制因素发生变化的强劲性。在以质量为目标的设计过程中，设计团队应努力按照尽量使各种难以控制的制造和运行参数所发生的变化成为最小的方式去设计产品及其工艺。提出支撑这种想法的理念在很大程度上要归功于金尼奇·塔古奇（田口玄一）及其首创于日本的质量控制中的降低成本法。田口玄一法即强劲设计（Taguchi methods 或 *robust design*）是一种工具和技术的集成系统，它要求工程师和科技人员在尽量减少产品和工艺的随意变化的同时，使其性能达到最高水平。作为强劲设计的主要技术、工具和原理包括质量降低函数、参数设计、公差设计、信噪比、技术开发和正交矩阵。每一种方法都另有文献专述（例如参考文献[12]和[13]）。

统计过程控制。用于质量改善的另一种工具就是由 W. E. 戴明（参考文献[14]和[16]）和席肯巴奇（参考文献[15]）提出的统计过程控制（*statistical process control*，即 SPC）。这是一种利用统计数学的处理程序，借助它可以对影响生产工艺输出结果的一些外界因素给出信号。该信号将提醒生产和质量人员关注，并消除过程中的差错，从而可用这种方法来鉴别和纠正造成产品元器件缺陷的成因。因为在任何制造过程中都存在着一些自然的随机变差，所以在这些随机变差和由于工艺条件的某种变化而引起的变异之间进行辨别的能力是对规定的特征和尺寸始终保持良性控制的重要组成部分。切削刀具的刀尖崩碎或磨损、调整的漂移、压力系统的泄漏以及较为稳定的焊料发生意外的变动就是几种工艺条件变化的例子，而这些变化常不易被注意到，但会造成质量下降，借助于 SPC 就可将它们检测出来。有关 SPC 的其他内容在本手册的其他各篇都有叙述。

全面质量管理。戴明还指出 85% 的质量问题是由系统、工序或管理造成的，只有 15% 是由技艺不佳所致（参考文献[16]）。责怪工人并不是解决质量问题的办法。顺便指出，85% 的质量问题中归咎于管理的还包括一些应追溯到产品设计中的缺点和错误。

目前所考虑的为改进质量控制的最佳管理方法就是要让工人深入地参与到质量监控和为解决质量问题而采取的改进措施中去。全面质量管理（*total quality management*，TQM）就是把工人都包括进来的一种管理方式。全面质量管理是一种比专用技术更为广义的管理哲理和战略。向前追溯，全面质量管理起源于日本，它包含：

- 在有关质量事务中，要有着强烈的客户取向。
- 强调质量为全体员工的总体义务，其全部功能包括研究、开发、设计、制造、材料、管理和服务。员工在质量事务中的参与是作为所有层面上的工作准则。供应商也要参加进来。
- 为了零差错生产而努力，完美是目标。
- 使用统计质量控制数据和其他有实际依据的方法，而不是凭感觉控制质量。
- 预防缺陷，而不是等它发生后再采取措施。
- 不断改进。

全面质量管理计划通常认为质量必须通过设计而不是生产过程的最终检验赋予产品的。参考文献库[7]提供了其他有关内容。

设计中的可靠性

定义。可靠性是设备或系统在其使用环境中，对它不发生失效的运行能力的一种衡量。美国国家宇航局（NASA）将可靠性定义为一个装置在其应有的运行条件下、在一个所要求的时间跨度里能正常运行的概

率。可靠性既然是一个概率，那么其计算也就是应用数学的形式。然而概率论和统计学就像其他数学方法一样，只能作为逻辑推理的辅助手段而不能取代这种推理。

可靠性等同于一种对事物的认知状态，而不是其本身的状态。可靠性并不能用于预测离散的或孤立特定的事件，只能预测平均概率。如果给定事件在同等条件下大量重复地发生，那么概率就是预期该事件发生的一种平均度量。概率可以代替确定性起作用。其归纳是由样本构成的，所得出的结论不能认为是绝对正确的。

NASA 对于可靠性的定义（和其他任何相关的定义）包括特定装置的“正常运行”。但是正常运行并不存在一般的定义，而必须事先对所考虑装置的正常运行规范予以仔细而又精确的描述或认定。

0.99 的可靠性意味着有百分之一的失效概率。0.999 的概率并不意味其有更高的精度（一个更为有意义的数字），两者只是一个数量级的差别，即千分之一的失效概率。

可靠性作业。就像 NASA 的定义一样，所有的一般定义都是定性的。在运行时间为 t 的可靠性可以定量地定义为：

$$R(t)=P(T>t) \tag{1.3-1}$$

式中，R 是可靠性，P 是概率，T 是装置发生失效的时间（T 本身是一个变量）。

保证可靠性的首要任务就是推导和验证式(1.3-1)。对于单一元件这是做的第一件事。于是整个系统的可靠性就取决于组成该系统的所有单元都能保持其功能和结构。然后它也只是更为复杂的系统中的一部分。该构建过程一直持续到整个系统都经过这样的处置。一个完整的系统可以是这样复杂的，以致它将包含整个机构，如维修小组及其人员组成。

在该系统及其可靠性被真正了解之后的第二件事就是找到提高可靠性的最佳途径。为此，最重要的方法就是：

- 按照所要求的功能把复杂性降低到最低限度。一些不必要的元器件和不必要的复杂性只会增加系统失效的概率，即降低其可靠性。
- 增加系统中元器件的可靠性。
- 使用平行备份。使一个或多个备用“热”点处于平行运作状态。当一个因故失效，其他的仍在发挥作用。
- 使用待机备份。使一个或多个备用“冷”点处于待机状态。当一个元器件或子系统因故失效时，能即时起动顶替其发挥作用。
- 利用维修机制。由技术人员更换失效元器件，而没有待机备份可供起动。这种更换既非自动也不必立即进行。
- 利用预防性维护。元器件进行定期更新，即在更换前尚未发生失效。

第三件事情就是在给定的重量、大小和成本条件下，使系统的可靠性达到最大限度，反之就是在给定可靠性的前提下，使重量、大小和成本达到最小限度。

可靠性的图解法。假设有一批作为一个总体的相同元件，从中采集一个非常大的样本，并使它们在时间 $T=0$ 时处于运行状态（相对 t，T 为工作期限，通常指运行寿命或执行任务的时间段）。一开始该总体显示出高失效率。接着如图 1.3-12 所示失效率迅速降低。这个失效率降低的阶段有不同的名称，如早寿命期、初始失效期和试运行期。由于设计和制造的欠佳，也就是一些质量有欠缺或不达标的元件所造成的失效。

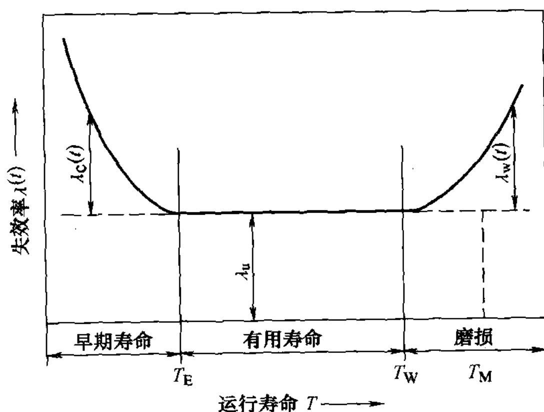


图 1.3-12　失效率曲线，相对时间的失效发生率（示意图）。引自参考文献[18]

当到了 T_E，所有不达标的元件都失效过了，失效率稳定地维持在基本不变的数值上。这就是所谓的*有用寿命*，因为元件都能以最大的优势被使用。在该有用寿命期里的失效是随机性、偶然性或突发性的，因为他们都是随机和不可预料地发生的。

当元件到达 T_W 时，失效率又增加了。这时元件由于时效或磨损而接近其额定寿命，这时元件由于衰变开始发生失效。

通过适当的设计、制造和装配、和/或经过谨慎的老化期，可以使得早期寿命尽量缩短（甚至消除）。对于一些要求能令人满意地超期运行的系统通过在有用寿命期里把失效的部件更换或者不论其有用寿命是否到期都予以一一更换（即使它们还没有发生失效或仅有即将发生失效的迹象），就能将意外磨损几乎无

限期地推迟发生。参考文献[19]对如何估算有用寿命、发生失效的平均时间和两次失效之间的平均间隔时间提供了更为详细的叙述。

可靠性试验。可靠性试验用于测试或演示设备在特定的工况条件下满意地运行一段预定的时间间隔的能力。假定系统有 10 个元件串接在一起，它们必须以0.99 的可靠性工作1000h，那么一个元件的特征寿命必须约为 10^6h（将近 115 年）。为了得到试验的结果就要求对 10 个元件中的每一个都进行超过 115 年的无失效试验（用 115 个元件试验一年或用 1150 个元件试验 6 周）。如果零件的数量是好几百并且要求的可靠性是 0.999（这完全可能），那么显而易见所要求进行的试验将成为荒谬而不可能。然而这样的产品还是要设计、制造，并满足所保证的性能。

虽然最有用的还是以往的性能数据及工程判断能力，但是作为设计者来说还是要尽可能快地知道他的设计是否达到可靠性和/或寿命的目标。为了满足生产进度的要求，很少会真实地按照正常的工况条件进行试验。于是要求进行加速试验。有三个因素控制试验加速的程度：环境、样本大小和时间。环境包括零件所承受的，并且会影响到它的性能和/或耐用性的所有运行条件。试验从广义上分为两大类：①通过试验确定环境的哪些方面条件确实是至关重要的；②尽量加快确定性能的试验进程。

单变量试验（一次试验一个参数）对于环境因素而言并不总是有用的，因为它无法反映两个或两个以上的因素之间任何的交互影响。

因子试验可以用来估计每一种“受力状态”产生的主要（直接）影响、两种（或更多）受力状态之间的交互影响和试验误差（参考文献[20]～[24]）。有关内容将在后面“设计的统计学特征”一节中予以阐述。

进行一项完全的因子试验，特别是重复性试验常要求非常大量的单项试验或试验遍数。幸好在这种情形里只需对全部析因中的一部分进行试验，便可得到大部分所要求的结果。如在一个具有 19 个变量的情况里，作为完整的全析因研究将要求 500000 个样件。一种经合理筛选的部分析因设计只需要 20 个样件的研究就可以得到所要求的结果（参考文献[20]～[25]）。

缩短试验时间的加速试验可以采用下方法进行：①取用大量的样件，但只是试验到其中一部分到失效；②强化其受力状态；③突然死亡法试验。①和③的交替试验法对于大批量较为不太贵的元件的试验来说是特别有用。当只需试验少量较贵的元件时，顺序试验则更为有效。

如果有一定数量的元件同时进行试验时，失效将按照某一顺序从最薄弱的元件开始依次发生。该顺序对于寿命试验都是独一无二的（参考文献[26]）。一般说来，采用从 n 个试验中发生 r 个失效（$n>r$）来确定其特征寿命，要比从 r 个试验中发生 r 个失效所花费的时间要更短一些。例如，用 20 个元件要试验 200h 才导致发生 20 次失效，而从 20 个样件的试验中发生前 10 次失效只平均需 46h 就够了。

利用加大载荷的确可以缩短试验时间而且可能减少试验所要求的次数，但是一个主要问题是其相关性，因为需要对“常态”进行定义，并且必须有足够的过载数据与常态进行相关。拉宾诺维奇等人根据累积破坏提出一种方法（参考文献[27]）。柯诺弗等人开创了疲劳加速试验的先例（参考文献[28]）。将利用现场数据开发得到的强化加载的程序疲劳试验应用于汽车部件用钢使所需的试验时间缩短到原来的十分之一。这些成果对于无刻槽试件、有刻槽试件以及汽车元件都可适用。

其他一些有用的可靠性试验包括：突然死亡法试验（参考文献[18]和[21]），对于大批量的相对不太贵的元件的试验来说是特别有用；顺序试验（参考文献[18]和[21]），则对于小批量的较贵元件的试验特别有用。

再设计

再设计常能改善性能和降低成本，而且能在设计的早期阶段不时地进行再设计，也可以按照正式的设计审核程序来进行再设计。失效模式分析对于通过再设计来减少进一步发生的类似失效是特别有用的。这些技术常使产品的性能大为改进。

设计的标准化和简洁化可以显著降低成本而不必为之牺牲性能。作为仅保持产品最有效的大小、类型、牌号和型号的一个例子：在二次世界大战期间美国通过标准化将钢、黄铜和青铜制的阀的种类数量从 4080 种减少到2500 种。使用现成的标准元器件也能显著地节省成本。举一个节约的例子，如常用的¼－20 的螺栓长为 2in（50mm），这是一种大量库存的规格，即使觉得采用一个 1⅞in（48mm）长的螺栓更合适，但那很可能就要专门订货了。

如果通过装配的再设计使之采用 1½in（38mm）或 1¾in（44mm）的螺栓，那就节省得更多了。

通过再设计实现性能的替代可以为改进产品和降低成本提供更多的概率。性能替代的目的是为了找到一种可以满足设计要求的新的不同方法，如，通过再设计可以用螺栓连接代替焊接、压配合连接或粘结连

接。这个例子说明性能再设计方案的范围也许是相当有限度的，说不定会引起对产品的整体再设计。

设计的统计学特性

很多年以来工程师们就利用最便于使用的材料性能估算、工作负荷和其他的设计参数设计元件和结构。其中大部分的估算值一旦确定就可以作为设定的量或常数被普遍采用。这种方法称之为确定性法，通过它的每一组输入参数可得到一个或多个输出参数的测定，此处输出的参数包括一些因数的预测，例如作用应力、应变、偏移、变形、磨损率、疲劳强度、蠕变强度或使用寿命。事实上所有实用材料的性能和设计参数都表现出统计变异性和不确定性，并因此影响设计的适用性。

从本质上说，预防在使用过程中发生失效的设计也是一个统计问题。简而言之，当抗失效能力不足以抗衡所承受的工况条件时，工程元器件就会发生失效。不同形式的失效是由结构和性能的要求来决定的，它们可以是翘曲、永久变形、拉断、疲劳裂纹、因磨损使横截面缩小、腐蚀、侵蚀或由不稳定的裂纹生长而引起的断裂等。在上述任何一种情形里，作为特定设计的大批量元件的抗失效能力也是一个随机变量，而该随机变量的性质常随时间而变化。这些元件所承受的工况条件也是一个随机变量，它也能随时间而变化。以上两种变量在任何时间点上的交叉代表了预期失效的百分比，并将其作为元件可靠性的度量。

本节是从工程师的观点来阐述设计上的一些统计学特征。这也包含着首先明确一些统计学词汇的意思，因为这些统计学词汇现已被充分地引入日常的工程实践中，而许多工程师对统计学方面的工作却不甚在行。有关设计的统计学特征更为详尽的内容可参阅参考文献[29]~[33]和《ASM 手册》，第8卷力学试验和评价。

统计学词汇分类

随机变量。从试验的样件、零件、元件或者按照相同技术规范或标准设计的构件中采集的任何样品都会在其个体之间表现出某种性能上的变异性。正如早先已经讨论过的，性能可以用种类繁多的参数或一些参数的组合进行度量。在任何情况里，这些性能的度量无法控制，尽管人们常试图在预定的成本范围里通过优化使性能最大化。由于这些性能的度量无法控制并且具有固有的随机变异性，所以通常把它们称为随机变量。

一种结构材料的抗拉强度就可作为随机变量的实际例子。现有按照 ASTM、SAE/AMS、或美国国防部(DoD)颁布的技术规范指定生产的单一炉次和批次的材料经重复试验而多次测试得到的抗拉强度结果都不一样。即使每次的试验操作都是一样的且控制在工程精度范围内，但情况确实如此。表 1.3-6 表明按照同样的试验条件用明显相似的试件进行拉伸试验得到的结果也都不同，产生的数据是离散的或变化的。每一次的测试都是从同一炉次的材料里随机地选取试件。

表 1.3-6　两组不同炉号材料的抗拉强度测试的假想系列试验结果

样件号	抗拉强度			
	炉次 1		炉次 2	
	MPa	ksi	MPa	ksi
1	522	75.7	517	75.0
2	511	74.1	490	71.1
3	489	70.9	499	72.4
4	554	80.3	514	74.6
5	500	72.5	503	72.9
平均	515	74.7	505	73.2

密度分布函数。从统计学上说，密度函数就是一种表示作为随机变量在其可能有的数值中任取一个的概率函数。表 1.3-7 所示就是材料的疲劳寿命值所表现的分布状况。假设这 23 个测试值都是由一系列重

表 1.3-7　有代表性的疲劳数据，在疲劳循环中表现出的变异性

寿命间隔/10^6 循环次数	失效次数	发生疲劳时的循环次数/10^6 循环次数
0.0~0.5	1	0.425
0.5~1.0	5	0.583、0.645、0.77、0.815、0.94
1.0~1.5	7	1.01、1.09、1.11、1.21、1.30、1.41、1.49
1.5~2.0	4	1.61、1.70、1.85、1.97
2.0~2.5	2	2.19、2.32
2.5~3.0	2	2.65、2.99
3.0~3.5	1	3.42
3.5~4.0	0	—
4.0~4.5	0	—
4.5~5.0	1	4.66
总测试值数量	23	

复试验得到的，也就是在同样的模拟工况条件下重复进行的试验。疲劳寿命值的大致范围就是通过这些试验确定的，其最大的疲劳寿命是最小的试验读数的10倍。

图1.3-13就是由这些数据得出的近似密度函数结果。该图表示在发生失效的运行循环次数的等分间隔里所发生的疲劳寿命数量。每一个间隔的直方图表示在该循环次数间隔里所发生的疲劳失效的频次。很显然，该材料在其试验条件下所发生疲劳失效的概率，在整个可能的疲劳寿命范围里并不是常数。如果现在有300个测试值而不是23个，那么直方图将趋于稳态化。随着测试值数量的增加，由疲劳寿命中的随机变量所形成的频次直方图（见图1.3-13）所显示的那种“曲折”将不再出现，而且其形状也开始与一连续函数相似。如同这样分布的数学表达式就被称之为密度函数。

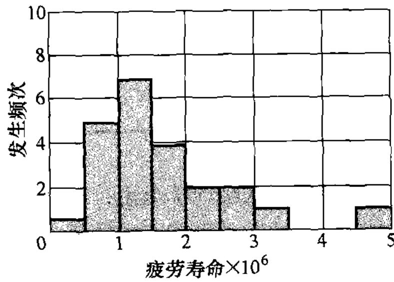
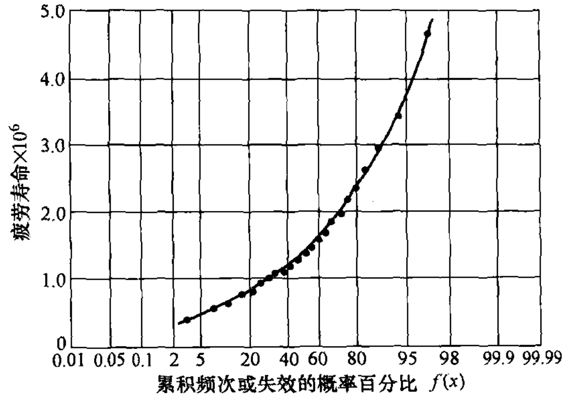


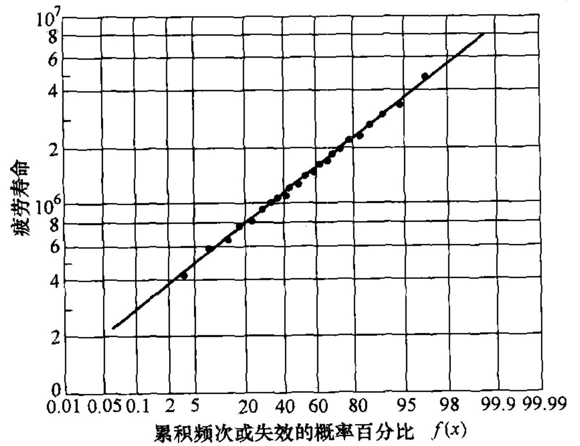
图1.3-13 由表1.3-7所示的近似密度函数绘出的直方图

累积分布函数。图1.3-13所示是利用作为密度函数的试验数据所绘的曲线，它提供了某种有用的统计学信息。由此可以得出有关数据的中心趋势以及数据里的整体变异性的一些推论。然而，从表1.3-7所包括的数据样本中，还可以得到另外一些信息，如表1.3-8所示的累积性地表示数据，把这些数据画在概率坐标纸上，如图1.3-14a所示，通过把这些测试数从最低到最高排列起来，再确定每一行的失效概率；就能从表中所列的统计试验值得出所谓的均值序列（作为例子，见参考文献[21]）。

样本相对于总体的参数。当进行确定性分析时，把输入参数定义成以某种特定方式所代表的材料。例如输入参数可以是一种材料屈服强度的平均值或典型值，或者为其技术规范的最小值。其内含的假设就是这种材料的屈服强度的无数次测试值，但是设定的平均值或最小值将与无限总体的真实值是相吻合的。当然我们所能做的最好办法就是产生一个有限的测试值来表征这种材料的性能（在本例中就是屈服强度），



a)



b)

图1.3-14 由表1.3-7的疲劳数据得出的累积分布函数

a）假设为正态分布 b）假设为对数正态分布

表1.3-8 由表1.3-7得到的累积疲劳失效分布

寿命间隔/×10^6	失效次数	累积失效次数
0.0~0.5	1	1
0.5~1.0	5	6
1.0~1.5	7	13
1.5~2.0	4	17
2.0~2.5	2	19
2.5~3.0	2	21
3.0~3.5	1	22
3.5~4.0	0	22
4.0~4.5	0	22
4.5~5.0	1	23

这些有限的测试值就被认为是其永远做不到的无限总

体的一种统计样本。从直观上看，增加测试值的数量（即样本的大小）应当能提高样本对于真值或总体的材料性质的估计值的精度。

变异性相对于不确定度。变异性和不确定度有时是两个可交换使用的术语。然而当谈论到设计的统计学特征时，对二者进行区分还是很有必要的。在大部分的字典里定义的不确定度为“存疑的条件”或与此类似的意义。在此前后文的讨论里，可认为不确定度是一种边缘状态，预期“真实”的技术参数，如元件的平均疲劳寿命，将处于该状态之内。为了量化这个不确定度，有必要确认所有由该不确定度所引起的因素，并将它们予以量化。一般地说，在设计的早期阶段，技术参数的不确定度是比较大的，并且随着试验的增加和分析工作的深入这个不确定度就会显著减小。通常这个不确定度是用置信度极限、公差极限或期望值极限表述的。

变异性是不确定度计算中的一个重要因素。它的意义就是来自于其词根——变量。从根本上说，设计过程中的所有因素都能被描述为随机变量，并具有某种程度的中心趋势或平均性能和某种程度离散性或变异性。对于连续变量这种变异性一般是用样本的标准偏差或方差来定量表示的，方差就是标准偏差的平方，即σ^2，其中σ是总体的标准偏差。

另外变异性一般也用变异系数来度量，它被定义为样本的均值除以样本的标准偏差（原文如此，应为标准偏差除以均值——译者注），一般用百分比表示。这个经正态化的参数可用于直接比较那些均值性质有明显差异的材料或产品的相对变异性。例如两种不同的铝合金会有如下表所示的抗拉强度：

铝　合　金	平均抗拉强度/ksi	标准偏差/ksi
1号	70	2.5
2号	75	4.0

1号铝合金的变异系数（COV）约为3.6%，而2号铝合金的约为5.3%。变异较高的2号合金的COV要高出1号合金的差不多50%，因此相比第一种合金，第二种合金的结构性能具有较高的不确定度。

准确度相对于偏移。当要考虑工程试验方法的适用性或要比较两种或多种方法或工艺的相对优势时，准确度和偏移是很重要的统计学术语（参考文献[33]）。有关试验方法准确度的一种解释就是它作为一种变异性的度量可以由一家颇具能力的实验室在所沿用的该试验方法得到的试验结果之间对这种度量进行估测。准确度也可被定义为样本标准偏差的倒数，这也意味着试验方法的离散性减小是以试验结果的标准偏差减小来表征的，从而直接导致其准确度的提高。反之，变异性或试验结果的离散性越大，其准确度也就越低。

两种不同工艺的试验结果（如热处理及其对抗拉强度的影响）能够用统计方法进行比较，而且可以就一种工艺相对于另一种工艺的准确度做出结论。但是只有在比较过程中不存在其他潜在的值得注意的变量，例如不同的试验设备、实验室或加工条件时，这个结论才会有效。

一组测量值的偏移可以定量地表示试验结果相对于可接受的基准值或标准的差别。偏移的概念也可被用于表述两个操作员、试验设备、试验时间、或实验室之间的一致性是否存在差别。精度一词有时也可作为偏移的同义词使用，但是有可能在对两组测量或操作程序的偏移进行辨别时，不一定需要知道哪一组的精度是最高的。为了对绝对偏移或精度做出判断，有必要拥有一个已知的基线或参考点，但作为一个工程师实际掌控的领域里却很少会有这样一些确定的参考点。

独立变量相对于非独立变量。许多工程分析都包括根据输入一套事先确定的工况条件而预测输出的某一结果。一个非常简单的例子就是根据应变的测量值、弹性模量的估算值或实测值对该金属在其弹性范围里的应力进行预测。另一个较为复杂的例子就是根据估算的局部应力、应变的幅度和通过试验得到的疲劳参数值对零件的疲劳强度进行预测。一般来说，上述这些关系是通过回归分析推导得到的，这时预测结果y是作为一个或多个输入量x_i和回归参数A_i的系列函数估算得出，如式（1.3-2）所示：

$$y = A_0 + A_1 f_1(x) + A_2 f_2(x) \cdots \quad (1.3\text{-}2)$$

（原文如此，疑应为：$y = A_0 + A_1 f_1(x_1) + A_2 f_2(x_2) \cdots$——译者注）

在式（1.3-2）中，预测结果y是非独立变量，而所定义的量x是独立变量。在某些情况里，需要将多个独立变量结合起来以便对这些独立变量进行更真实的估算。

为何只假设为正态性而不考虑复杂性？当大部分工程师把统计学应用到工程问题中时，首先都假设所讨论的问题性质是正态分布的。因为正态分布在数学上相对比较简单，易于理解并容易表征。使用非正态统计学分布和非参数性（无分布）分析方法的工程统计应用问题在数量上肯定不会超过正态统计学分布的应用。

在许多只关注其均值趋势或特性平均值的情况下

的正态分布假设都是合理的。当上述均值或平均值所蕴含的特性得到阐明时，这个假设的验证也就越显得重要，正如一个设计因素的上百位点的估值或一个二、三倍的标准偏差值要低于其均值。基于统计分布的这个假设将对由它所诠释的意义产生深远的影响。

统计分布

统计分布已经成为物理学的、力学的、电学的和化学的各种不同性质，以及其他许多事件发生的分布模型。已有七种为大家所熟知并广泛应用的统计分布，即正态、对数正态、韦布和指数四种呈连续型的，以及二项式、泊松和超几何三种呈离散型的统计分布。参考文献[34]～[36]集中提供了为数众多的，业已在统计学理论和实践的发展中广泛应用的统计分布的有关综合性内容。参考文献[21]对于非专业人员查阅有关统计分布及其实际应用是十分有用的。

正态分布。这是使用最广泛，并为大家最为掌握的统计分布。除了作为一种对许多计算统计学分布的近似而被广泛应用之外，正态分布也常成为物理学的、力学的、电学的和化学的各种不同性质的分布模型——例如抗拉强度、硬度、传导率和弹性模量。许多性质无论是正偏移还是负偏移，都是围绕十分确定的均值而随机散布的，并趋于一种正态分布。

与具有正态分布模型的实际测量相关的主要局限性就是测量值相对于其平均值的对称性。故歪斜或非对称的总体将不能很好地用正态分布模型表征。正态分布的主要优点就是可以有大量的文献介绍正态分布的数据分析方法。

图1.3-15所示的直方图代表某种材料的拉伸屈服强度的分布。它记录了每一个间隔里的测试值的数量。叠加在直方图上的连续概率曲线表明这些数据对于正态分布的吻合度，并且与双参数或三参数的韦布分布进行比较。

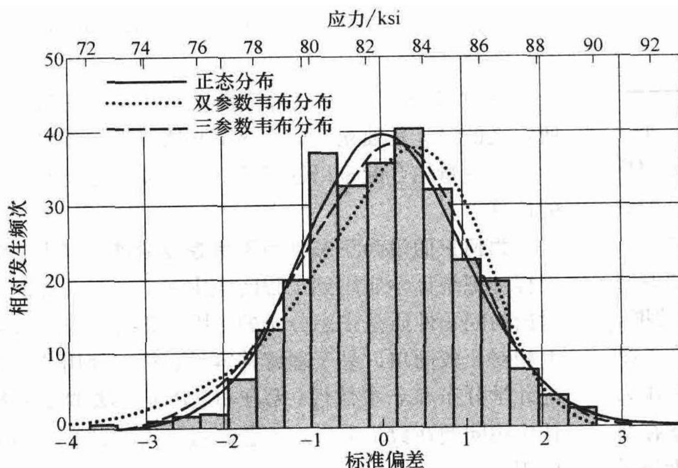


图1.3-15 叠加着概率密度函数的拉伸屈服强度值的直方图

对数正态分布。工程随机变量的第二种常用分布也许就是对数正态分布。当然，对数正态分布实际上也只是正态分布的一种特例，即认为呈正态分布的量值只是原始测试值的对数而已。例如，把表1.3-7中所列的材料的疲劳寿命值都取成对数值，再把这些计算值排列起来绘在正态概率纸上，就得到一条近似直线（见图1.3-14b），可以看出只是位于非常低和非常高的寿命处的数据趋势才偏离线性度。

韦布分布。常用于表征非常柔性的工程随机变量。最早提出这种分布是为了表示疲劳数据，然而现在用它表示许多其他类型的工程数据。作为一种给定寿命的疲劳强度模型，目前公认最为合适的只有韦布分布（参考文献[38]）。韦布分布之所以被广泛接受是因为其数据可以画在韦布坐标纸上；而且像正态分布一样，数据对于韦布分布的拟合性可以按累积分布函数的线性度来评价。

指数分布。作为韦布分布的特殊情况，它在分析一些完整的系统或装配的失效率中是很有用的，例如灯泡、热水器和汽车变速箱，或者其失效犹如因车轮在马路上压出的凹坑而随机造成的一类失效。

二项式分布。它所适用的随机变量为离散型的，并且是正整数。它通常用于为定期检验制造或材料质量而制订的采样计划。例如，它可以为从需要接受检验的大批元器件（如电器元件）中采集的样品的缺陷数量建立数学模型。

其他离散型分布。二项式分布的其他变型有超几何和泊松两种分布。超几何分布适用与二项式分布同样类型的用途上，除了二项式以外，缺陷件的百分比在整个测试过程中都假定为常数。

泊松分布与二项式分布、超几何分布的不同之处在于，事件发生的次数是未知的，但事件发生的概率却是已知的。

统计学方法

许多不同的统计学分析技术都能用于分析力学性能的数据。本节简要介绍经常使用的一些方法（参考文献[39]）。有关它们与其他统计学方法的详细描述及其有关的表格可以查阅许多工作手册和教科书（例如参考文献[40]）。

拟合良好性检验。这是用于检查样件可否真的认为是符合正态分布的。利用安德森-达林拟合良好性检验法可以确定由一组

给定的数据所拟合的密度函数能否用一条正态曲线来予以近似。这种检验包括在全部测试的性能区间内的累积分布函数与测试数据的数值比较。建议在算术正态概率纸上用图形表示正态分布函数相对一组数据的拟合程度。对数正态概率纸可以用于确定拟合的数据分布能否通过对数转换而正态化。一个坐标轴以所测性质的单位为刻度，而另一个坐标轴则以非线性概率为刻度，参阅参考文献[41]和[42]。

显著度检验。这包括F检验和t检验，适用于确定被分别采集样本的两个总体是否有一致性。F检验用于确定两种产品在其变异性方面是否有差别。t检验用于确定两种产品在其平均性能方面是否有差别。如果答案是肯定的，则说明这两种产品不属于同一个总体。

在进行t检验时，可先经过F检验来假定两个产品的变量是近似相等的。如果F检验表明这两个变量显著不一致时，则不必再进行t检验了。

数据回归法。如果不能确定一个平均测量值相对于其他的测量值存在着线性或曲线性的变化关系，则常用回归分析法来检查和描述这两个量之间的关系。例如产品的厚度对于抗拉强度的影响、温度对于屈服强度的影响以及应力对于发生失效的循环次数或对发生破坏的时间的影响。参考文献[43]介绍了进行线性回归计算的数学方法。

有关ASTM的工程统计学标准

表1.3-9列举了由美国试验和材料学会(ASTM)颁布的一些标准，都是用于介绍与工程设计有关的统计学问题。这些标准都是受ASTM有关标准方法的E11委员会监控的。该机构的一个主要目的就是在统计学方面指导其他的ASTM委员会，并就一般性的应用提供信息。

表1.3-9　与工程统计学有关的ASTM标准

ASTM编号	名　称	ASTM编号	名　称
统计学术语		试验数据的统计分析	
D4392	统计相关词汇的术语汇录	E178	处理测试结果偏离的方法
E177	ASTM试验方法中词汇准确度和偏移的使用方法	E739	线性的或经过线性化的应力寿命($S—N$)和应变寿命($\varepsilon—N$)的疲劳数据的统计分析方法
E456	统计学相关的术语		
E1325	试验设计相关的术语	实验室之间试验程序的统计学分析准则	
E1402	采样相关的术语	D4467	在实验室之间对生成非正态分布数据的试验方法进行测试的方法
按技术参数的统计学验证			
D3244	利用试验数据进行技术规范验证的方法	E691	在实验室之间为测定试验方法的准确度进行研究的方法
E122	为估算一个批量或过程的测试质量而选择样本采集大小的方法	制定采样计划中的统计学问题	
试验方法的统计学控制和比较		D4854	由预期制订采样计划的依据估算其变异性大小的准则
D4356	确定相容试验公差的方法		
D4853	减小试验变异性的准则		
D4855	比较试验方法的方法	E105	材料的概率采样方法
E1323	评估实验室测试方法和对数据结果进行统计分析的准则	E141	依据概率采样的结果验证其合格的方法

设计中的总体寿命周期

在满足产品的功能性要求的前提下，使成本最小化是设计产品的一个必须遵循的工程原则。通常都是倾向于严格以元器件成本和劳务成本(再加上所许可的管理、销售和利润)为主，来核算产品的成本。然而这样的计算还是在总的成本中忽略了好几项对用户来说是很重要的费用，如能源成本、产品的维护成本、跌价成本以及报废处置成本。除了相对于生产商和用户的成本之外，还有大量的社会成本，其中的一部分是由于消耗原材料和能源以及产品对环境所造成的影响等因素引起的。在设计过程中，所考虑的用户

和社会成本的相对重要性部分地取决于产品的性质。例如，一辆汽车有用户和社会成本，而对于一个螺钉的这些成本是很低的，也很难确定，故很容易被忽视。

对于材料工程师而言，整体寿命周期概念不但必须包括如前面已讨论过和表 1.3-3 中所列的产品总寿命，而且还应该包括产品中的元器件和材料的整体寿命周期。只要可能，产品应当设计成凡是没有被磨损坏的元件都能重新使用，或者产品中的材料都可以被回收再生的。

寿命周期分析(LCA)。这是指对于一个产品设计的能源要求和环境影响的所谓“清仓”式评估。该产品的整体寿命周期的所有方方面面都必须予以考虑，包括原材料的地下开采、产品制造、使用、回收(含再生设计)和报废处置。在本手册(下册)第 4 篇第 10 章中，还将讨论在寿命周期分析中所需考虑的一些关键性因素。

能源要求。元器件和材料的再利用显然就是为了节省原材料，例如冶炼金属所需的矿石，同时也是为了节省从矿石中提炼金属所需要的能源。基础性的金属生产过程都是高能耗的。如果把饮料罐的金属予以回收利用的话，那么据估计可以节省由矿石制成铝饮料罐所需消耗能源的 95%。还有可能通过选用不需要经过热处理，但仍具有相当强度的材料来节省能源。经深度冷拉和应力释放的钢棒料仍可达到 690MPa(100ksi)的屈服强度，这样的钢棒料在很多的用途里是可以代替需经淬火-回火的钢棒料使用。从这两个例子，特别是那些具有经济或政治意义的能源，很能说明节省稀有资源的潜力。

诚如上文所述，运行一台机械装置所需要的能量在其总体寿命周期的成本中占有显著的部分。例如一台空调机在其保质期内运行所耗费的电力成本将大于它的购置价格。

可生产性。可生产性的问题会在若干个层面上影响工程设计。首要问题就是所用的技术能否按照要求的批量经济地生产出所设计的产品。无论何时，只要可能产品就应当按照已有的技术条件进行设计，在极限技术条件下进行制造将会造成较高的废品率和增加生产的难度，故超越极限的技术条件将要求在开始生产之前先制定一个开发计划。其次所关心问题为工厂(或整个工业)生产所需数量零件的能力。第三则是有关现有设备和人员的利用问题。上述问题的一部分答案在于其管理特性，但是对于设计者而言，通常有必要分析不同的可能性并制定一整套管理上的预案，包括其可能的后果以及各个方案的优缺点。

耐用度。或称使用的预期寿命，它是设计所必须依据的参数之一。一般地说，使用寿命的主要目标是为设计者设定的，而不是由设计者来决定的。也就像可生产性一样，设计人员有必要制定可供选用的材料和设计的各种搭配方案，这些方案都会对产品预期的使用寿命产生重要影响。

质量保证。它应当是任何产品的制造过程中的一个组成部分，特别是当有缺陷的产品被允许流入市场而有可能造成可怕的后果时。这里并不试图对质量保证计划进行叙述，而只是在强调这个计划重要性的同时指出设计与质量保证之间是如何相互关联的。

作为断裂力学基本理论中的一部分，一个设计者必须知道材质中所存在的不均匀性的类型及其严重性，而这种不均匀性是能够在质量保证计划中予以检测的，而且其检测方法有足够的可信度。基于对质量保证计划预期作用的充分了解，设计者就能够为弥补实际存在的却又无法检测到的不均匀性提供一条安全的红线。这也是断裂力学基本原理的一部分。还有类似的方法也可以作为附属系统用于产品的设计。无论如何要记住，产品应该设计成为既有质量保证计划的能力，又有其一定的限度。

搬运。在工程设计中，漠视各种产品的搬运要求简直太常见了。几乎是毫无例外的，产品都是在一个地方制成而在另一个地方使用的。于是就不可避免地要提供一种将它从制造商到销售商再到用户的运输方法，而这种运输方法将会以几种方式影响产品的设计。最明显的考虑就是要保证产品不会在搬运、运输和储存的过程中受损。无论何时只要可行就应该把产品设计成：用正常的方法是不可能造成损坏的。容易在搬运中受损的产品，则必须仔细(和昂贵)地通过包装甚至特殊的运输方式予以保护。另外，在设计产品的时候，将对运输和储存的要求减小到最低限度也很重要。例如废物篮通常设计成在搬运时可以叠套在一起，但为了便于将它们分开，许多废物篮都设计成具有凸缘或其他结构，以免被叠得太紧而不易分开。特别是消费产品不应考虑把包装作为产品的一部分来进行设计，可是设计人员还是应适当考虑到因采用不同的设计方案而形成的包装需求。

设计中的其他主要因素

除了表 1.3-2 所列的性能要素和表 1.3-3 所描述的整体寿命周期的设计依据以外，材料选择还有一些其他的主要因素如表 1.3-4 所示。

技术背景

在大部分的情况里，特定领域里的技术背景是可以根据市场上现有产品的工程评估进行推断的。现有产品可能缺少一些能由新产品提供的功能。新产品可改进的范围将包括从纯粹的装饰(这属于一种试图利用原有产品已为市场所接受而对新产品进行投资的情况)到将其重新设计成为与以往的产品完全不一样的全新产品。技术背景的定义不仅取决于现有产品，还取决于工业和社会的标准、技术公布和专利。专利侵权常被认为是法律部门的事情，而技术人员往往才能对装置和工艺专利中的那些可以应用到新产品里的技术层面进行分析。

设计的法规和标准

许多产品都必须执行强制性或非强制性的标准。按照定义，法规属于标准中的一部分，包括当地政府强制性颁布的有关保护公众安全、健康的建筑结构安全标准(建筑法规)，有关健康要求的管道、通风等方面的标准(卫生和健康法规)，以及消防逃离和出口的技术参数(消防法规)。而"标准"则定义为"由主管单位经过研究或经表决通过的，作为比对基础而颁布的规定，且经过有关批准程序"。

实际上，法规告诉用户做什么，并且何时做、在什么情况下才可以做。法规常常还是法律要求，由当地司法机构予以采用，然后再强制执行其条款。而标准则告诉用户如何去做，通常只是作为一种推荐而没有法律上的强制力。正如在法规的定义中所提及的，在制定法规时常采用标准作为其参考文献。在地方法规的章节中，参照国家认可的标准是很平常的事。法规引用标准的全部章节作为其参考文献，然后使其具有法律意义上的强制性，这样的例子也是很多的。通常把这些标准作为清单列于法规的附录中。

法规与标准的需要。法规与标准所包含的信息对于所有各学科领域的设计者来说都是非常重要的。一个设计问题一旦被确定下来，解决问题方案中的关键步骤就是收集有用的参考材料，而法规和标准则是其中必不可少的部分。法规和标准的运用能为设计者的部分相关工作提供有益的指导，并保证其产品符合适用法律的要求。

法规和标准在设计方面的基本需求是基于以下两个原则：零件和元器件的互换性和兼容性。为了保证互换性，在特定制造公司内部的零件标准化只是工业化生产问题的一部分，另一部分就是其兼容性。当从一个公司按标准生产的零件与另一个公司按标准生产的零件组合在一起时，就会产生一个问题，即公司A的零件能否与公司B的零件相适应？是的，只要两者是兼容的就能适应。换而言之，这两家公司的标准必须是一样的。

法规和标准的普通例子。大部分的材料工程师都很熟悉业已制订的许多专业性的社会法规。美国机械工程师协会(ASME)公布了锅炉和压力容器的法规，它被作为设计标准使用了几十年。美国汽车工程师协会(SAE)颁布了数百个与车辆及其辅助机具的设计和安全要求有关的标准。而ASTM颁布了几千个与材料和试验方法有关的标准。这些标准分割成15个章节，以70卷本出版。这些标准在审核过程中都是在一致赞成的基础上，经过若干程序而制订的。一开始标准都是以试行本出版，这些标准在最后批准之前都标注有T字。定期审查可保持要求和方法的更新。因为设计人员经常要为他们的材料技术指标提出ASTM的试验要求，所以他们应该经常核查ASTM的清单，搞清楚所用的版本是否正是所需要的。

在美国国内，标准的协调、批准和分发工作都是由在纽约的美国国家标准协会(ANSI)负责的。作为提议的商业协会将要求ANSI审查其标准。于是将要成立一个由非工业的许多其他小组成员组成的审查小组。这样就扩大了一致赞成的范围，这也是ANSI过程的一个主要特点。表1.3-10列出许多作为标准的提议组织中的部分名单，它们作为标准的提议者由ANSI以其一致赞成的方式完成标准的制定。

表1.3-10 由美国国家标准协会公布的标准发起组织

缩语简称	组　织	缩语简称	组　织
AAMA	American Apparel Manufacturers Association 美国制衣协会 2500 Wilson Blvd., Arlington, VA 22201, (703)524-1864	AAMA	American Architectural Manufacturers Association 美国建筑商协会 1540 E. Dundee Rd, Palatine, IL 60067, (708)202-1350

（续）

缩语简称	组 织
AAMI	Association for the Advancement of Medical Instrumentation
	医疗仪器促进协会
	3330 Washington Blvd., Arlington, VA-22201 (703)525-4890
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
	美国州高速公路和运输办公室联合会
	444 N. Capitol St., N. W., Washington, D. C. 20001, (202)624-5800
AATCC	American Association of Textile Chemists and Colorists
	美国纺织化学家和印染师协会
	P. O. Box 12215, Research Triangle Park, NC22709-2215, (919)549-8141
ABMA	American Bearing Manufacturers Association and Anti-Friction Bearing Manufacturers Association (AFBMA)
	美国轴承制造商协会和耐磨轴承制造商协会
	1900 Arch St., Philadelphia, PA 19103, (215) 564-3484
—	American Boat and Yacht Council
	美国游船和快艇协会
	3069 Solomon's Island Rd, Edgewater, MD21037-1416, (410)956-1050
ACI	American Concrete Institute
	美国水泥学会
	P. O. Box 19150, Detroit, MI48219, (313) 532-2600
ADA	American Dental Association
	美国牙科协会
	211 E. Chicago Ave., Chicago, IL 60611, (312)440-2500
AGA	American Gas Association
	美国气体协会
	1515 Wilson Blvd., Arlington, VA 22209, (703)841-8400
AGMA	American Gear Manufacturers Association
	美国齿轮制造商协会
	1500 King St., Alexandria, VA 223 14, (703)684-0211
AHAM	Association of Home Appliance Manufacturers
	家用电器制造商协会
	20 W. Wacker Dr., Chicago, IL60606, (312) 984-5800
AIA	Automated Imaging Association
	自动化图像协会
	900 Victor's Way, Ann Arbor, MI48106, (313)994-6088
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
	美国航空航天学会
	370 L'Enfant Promenade, S. W., Washington, D. C. 20024, (202)646-7400
AIIM	Association for Information and Image Management
	信息和图像管理协会
	1100 Wayne Ave., Silver Spring, MD 20910, (301)587-8202
AISC	American Institute of Steel Construction, Inc
	美国钢结构学会公司
	1 E. Wacker Dr., Chicago, IL 60601-2001, (312)670-2400
ANS	American Nuclear Society
	美国核学会
	555 N. Kensington Ave., La Grange Park, IL 60525, (708)352-6611
API	American Petroleum Institute
	美国石油学会
	1220 LSt., N. W., Washington, D. C. 20005, (202)682-8000
ARI	Air-Conditioning and Refrigeration Institute
	空调和制冷学会
	4301 N. Fairfax Dr., Arlington, VA22203, (703)524-8800
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
	美国农业工程师学会
	2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659, (616)429-0300

（续）

缩语简称	组　　织
ASCE	American Society of Civil Engineers 美国土建工程师学会 1015 15th St．，N. W．，Washington，D. C. 20005，(202)789-2200
ASHRAE	American Society of Heating，Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 美国制热、制冷和空调工程师学会 1791 Tullie Circle，N. E．，Atlanta，GA30329，(404)636-8400
ASME	American Society of Mechanical Engineers 美国机械工程师学会 345 E. 47th St．，New York，NY 10017，(212)705-7722
ASQC	American Society for Quality Control 美国质量管理学会 611 E. Wisconsin Ave．，Milwaukee，WI 53201，(414)272-8575
ASSE	American Society of Sanitary Engineering 美国卫生学会 P. O. Box 40362，Bay Village，OH44140，(216)835-3040
AWS	American Welding Society 美国焊接学会 550 LeJeune Rd．，N. W．，Miami，FL33126，(305)443-9353
AWWA	American Water Works Association 美国水厂协会 6666 W. Quincy Ave．，Denver，CO 80235，(303)794-7711
BHMA	Builders Hardware Manufacturers Association 建筑用硬件制造商协会 355 Lexington Ave．，New York，NY 10017，(212)661-4261
CEMA	Conveyor Equipment Manufacturers Association 传送设备制造商协会 9384-D Forestwood Ln．，Manassas，VA22110，(703)330-7079
CGA	Compressed Gas Association 压缩空气协会 1725 Jefferson Davis Highway，Arlington，VA22202-4100，(703)412-0900
CRSI	Concrete Reinforcing Steel Institute 混凝土用钢筋学会 933 Plum Grove Rd．，Schaumburg，IL 60173，(708)517-1200
DHI	Door and Hardware Institute 门及其硬件学会 14170 Newbrook Dr．，Chantilly，VA 22021-2223，(703)222-2010
EIA	Electronic Industries Association 电子工业协会 2500 Wilson Blvd．，Arlington，VA 22201，(703)907-7550
FCI	fluid Controls Institute 流体控制学会 P. O. Box 9036，Morristown，NJ 07960，(201)829-0990
HI	Hydraulic Institute 液压学会 9 Sylvan Way，Parsippany，NJ 07054-3802，(201)267-9700
HTI	Hand Tools Institute 手动工具学会 25 North Broadway，Tarrytown，NY 10591，(914)332-0040
ICEA	Insulated Cable Engineers Association 绝缘电缆工程师协会 P. O. Box 440，South Yarmouth，MA02664，(508)394-4424
IEC	International Electrotechnical Commission 国际电工委员会 Geneva，Switzerland. Communications：c/o ANSI，11W. 42nd St．，NewYork，NY10036，(212)642-4900

(续)

缩语简称	组 织	缩语简称	组 织
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers 电气电子工程师学会 345 E. 47th St., New York, NY 10017, (212) 705-7900	NFoPA	National Forest Products Association 国家森林产品协会 1111 19th St., N. W., Washington, D. C. 20036, (202)463-2700
IESNA	Illuminating Engineering Society ofNorth America 北美照明工程学会 120 Wall St., New York, NY 10005-4001, (212)248-5000	NFiPA	National Fire Protection Association 国家消防协会 1 Batterymarch Park, P. O. Box 9101, Quincy, MA02269-9101, (617)770-3000
IPC	Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits 电子线路的耦合和浇注学会 2215 Sanders Rd., Northbrook, IL60062-6135, (708)509-9700	NFlPA	National Fluid Power Association 国家流体动力协会 3333 N. Mayfair Rd, Milwaukee, WI 53222-3219, (414)778-3344
ISA	Instrument Society ofAmerica 美国仪器学会 P. O. Box 12277 Research Triangle Park, NC27709 (919), 549-8411	NISO	National Information Standards Organization 国家信息标准组织 4733 Bethesda Ave., Bethesda, MD 20814, (301)654-2512
ISDI	Insulated Steel Door Institute 绝缘钢门学会 30200 DetroitRd, Cleveland, OH44145-1967, (216)899-0010	NSF	National Sanitation Foundation, International 国际卫生基金 4201 Wilson Blvd., Arlington, VA22230, (703) 306-1070
ISO	International Organization for Standardization 国际标准化组织 Geneva, Switzerland, Communication: c/o ANSI, 11 W. 42nd St., New York, NY 10036, (212)642-4900	NSPI	National Spa and Pool Institute 国家温泉和湖学会 2111 Eisenhower Ave., Alexandria, VA 22314, (703)838-0083
NAAMM	National Association of Architectural Metal Manufacturers 国家建筑用金属制造商协会 11 S. La Salle St., Chicago, IL60603, (312) 201-0101	OPEI	Outdoor Power Equipment Institute, Inc. 户外电力设备学会公司 341 S. Patrick St., Alexandria, VA 22314, (703)549-7600
NAPM	National Association of Photographic Manufacturers 国家摄影器材制造商协会 550 Mamaroneck Ave., Hanison, NY 10528, (914)698-7603	RESNA	Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America 北美康复工程和辅助技术学会 1700N. Moore St., Arlington, VA 22209-1903, (703)524-6686
NEMA	National Electrical Manufacturers Association 国家电工制造商协会 1300N. 17thSt., Rosslyn, VA 22209, (703) 841-3200	RIA	Robotic Industries Association 机器人工业学会 900Victors Way, Ann Arbor, M148106, (313) 994-6088

（续）

缩语简称	组　织
RMA	Rubber Manufacturers Association
	橡胶制造商协会
	1400 K St.，N. W.，Washington，D. C. 20005，(202)682-4800
SAAMI	Sporting Arms and Ammunition Manufacturers Institute
	运动枪支和弹药学会
	flintlock Ridge Office Center，11 Mile Hill Rd.，Newtown，CT06470，(203)426-4358
SAE	Society of Automotive Engineers
	汽车工程师学会
	400 Commonwealth Dr.，Warrendale，PA 15096，(412)776-4841
SIA	Scaffold Industries Association
	脚手架工业协会
	14039 Sherman Way，VanNuys，CA 91405-2599，(818)782-2012
SMA	Screen Manufacturers Association
	屏幕制造商协会
	2545S. Ocean Blvd.，Palm Beach，H.. 33480-5453，(407)533-0991
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
	摄影和电视工程师学会
	595 W. HartsdaleAve.，White Plains，NY 10607，(914)761-1100
SPI	The Society of the Plastics Industry，Inc.
	塑料工业学会公司
	1275 K St.，N. W.，Washington，D. C. 20005，(202)371-5200
TIA	Telecommunications Industries Association
	电信工业协会
	2001 Pennsylvania Ave.，NW.，Washington，D. C. 20006-4912，(202)457-4912，(202)682-4800
SAAMI	Sporting Arms and Ammunition Manufacturers Institute
	运动枪支和弹药学会
	flintlock Ridge Office Center，11 Mile Hill Rd.，Newtown，CT06470，(203)426-4358
SAE	Society of Automotive Engineers
	汽车工程师学会
	400 Commonwealth Dr.，Warrendale，PA 15096，(412)776-4841
SIA	Scaffold Industries Association
	脚手架工业协会
	14039 Sherman Way，VanNuys，CA 91405-2599，(818)782-2012
SMA	Screen Manufacturers Association
	屏幕制造商协会
	2545S. Ocean Blvd.，Palm Beach，H.. 33480-5453，(407)533-0991
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
	摄影和电视工程师学会
	595 W. HartsdaleAve.，White Plains，NY 10607，(914)761-1100
SPI	The Society of the Plastics Industry，Inc.
	塑料工业学会公司
	1275 K St.，N. W.，Washington，D. C. 20005，(202)371-5200
TIA	Telecommunications Industries Association
	电信工业协会
	2001 Pennsylvania Ave.，NW.，Washington，D. C. 20006-4912，(202)457-4912

注：表中组织的中文名称系译者所加，仅供参考。——译者注

ANSI将标准的草稿分发给所有感兴趣的机构以征求他们的意见。同时为意见的回收设置期限，之后由标准审查委员会研究这些意见，并由此决定哪些有修改的必要。经过多次审核的标准最后由ANSI颁布和出版，并将其列于目录中让所有需要者可以买到它。国际标准组织(ISO)从1996年开始也按类似的程序把标准推广到世界范围。由ISO成员颁布的标准也都列入ANSI的目录中。

标准的信息服务。由美国和其他若干国家的超过350个标准生成组织出版的标准文本及其有关消息都可以从一些销售商，如英格尔全球工程文件公司购买得到。它们还能以光盘、磁带、缩微胶卷或缩微胶片等形式提供信息。全世界许多国家都有类似的业务。

设计中人的因素及其安全考虑

设计中人的因素。这是为了阐述装置与其所有使用者或维护者的互动关系。作为设计中人的因素的例子，如设计手提式电钻的把手要使其适合使用者舒适地操作，又如布置安排汽车仪表板上的仪表和控制按钮要便于对其观察和操作，以及设计一种喷射器可将电动混料机中的搅拌器省去。人的因素还包括操作方法和程序、试验和评估这些方法和程序、工作岗位设计、岗位辅助和培训资料的编纂以及将来的操作人员的遴选和培训。

作为专门处理人的因素的工业工程学的一个分支称之为人机工程学，对设计者来说，与该领域的研究人员进行接触交流将是有益的。参考文献[44]～[46]列举介绍了有关设计中有关人的因素的一些很有用的案例。

设计中的安全考虑。任何产品（如消费性产品、工业设备、工具、系统等）的设计和制造人员都有义务保证产品的安全（即把与产品有关的安全风险降至可接受的限度）。本文中，“安全”意味着产品的危险性已降低至不能再低的最低限度（作为法律意义上的定义），也就是说安全不仅是针对有意识的使用，还包括一切无意中但是可预见的使用。以普通的平头螺钉旋具（螺丝刀）为例，对它的有意识使用大家都很清楚，但是难道会有什么人说从来没有以别的用途来使用过螺钉旋具吗？因此它必须按照在所有这些使用过程中都是安全的来进行设计和制造。

对于安全设计有以下三个方面的问题或步骤：

1. 使产品安全（即在设计中排除产品的所有危险因素）。

2. 如果在设计中不可能排除所有的危险，则应提供防护以消除危险源。

3. 如果也不能提供合适和完整的防护，则需提供必要的使用说明和警示。

详述在设计中执行这些步骤的原理和特别准则已超出了本文范畴，但是在安全设计方面有大量的文献可供查阅（见参考文献[47]～[50]）。还可以从ANSI和国家安全委员会得到有关安全与控制或消除工作场所危险性的有关文件。

美学

几乎对于所有的产品设计来说，美学都是一个重要的方面，可是这并不应当以牺牲性能方面的要求为代价。有一些消费性产品仅仅是以其美学外观进行销售的，这类产品通常要由艺术人员来进行设计。然而美学外观对于工业产品也很重要的。一种光滑、闪亮和惹人喜爱的艺术形状的产品或者外观丑陋、尚且耐用并对于其发挥性能的能力方面几乎不会有或根本没有影响的产品，二者相比，后者对于潜在的顾客态度和被投入使用时操作人员的接受程度将大打折扣。

成本

假定产品满足为其规定的基本性能要求，那么设计和制造中最为重要的单一要素就是成本。任何产品的成本必须与市场已有的、可类比的其他产品的成本相比，具有竞争性。无论是可直接类比的产品与否，成本必须足够低，以使预期中的购买者相信，他们从该产品中的得益将超过其成本。对成本-利润的研究在主要设备的购置中几乎总是处于优先地位。

成本一般作为判断其设计是否有优势的若干关键要素之一而进入设计过程的。无论何时，只要在不同的材料、设计或制造工艺之间存在着选择的余地，就要在满足产品基本功能的前提下按照最低成本进行筛选。在有些情况下，为了明显地降低成本，可能会不惜重新评价产品的基本性能要求和性能技术参数，或许只需稍微调整一下设计目标就可以取得较大的成本降低。然而重要的是，要记住：对功能要求和性能技术参数所作的任何消减都有可能对产品的应用性和市场销售性产生负面影响。

参考文献

[1] J.B. Fussell and D.P. Wagner, Fault Tree Analysis as a Part of Mechanical Systems Design, *Engineering Design*, Proceedings of the Mechanical Failures Prevention Group, 25th Meeting, NBS 487, National Bureau of Standards, 1976, p 289–308.

[2] C. Starr et al., The Philosophical Basis for Risk Analysis, *Ann. Rev. of Energy*, Vol 1, 1976, p 629–662.

[3] G. Kardos, Risk and Hazard Analysis in Design, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 117–125.

[4] R.R. Landers, A Failure Mode and Effect Analysis Program to Reduce Mechanical Failures, *Engineering Design*, Proceedings of the Mechanical Failures Prevention Group, 25th Meeting, NBS 487, National

Bureau of Standards, 1976, p 278–288.

[5] J.J. Hollenback, "Failure Mode and Effect Analysis," Paper 770740, American Society of Agricultural Engineers, 1976.

[6] H.D. Wolf, Safety Analysis: Qualitative, Quantitative and Cost Effective, *Engineering Design*, Proceedings of the Mechanical Failures Prevention Group, 25th Meeting, NBS 487, National Bureau of Standards, 1976, p 265–277.

[7] J.O. Almen, Probe Failures by Fatigue to Unmask Mechanical Causes, *SAE Journal*, Vol 51, May 1943.

[8] T.C. Fowler, *Value Analysis in Design*, Van Nostrand Reinhold, 1990.

[9] G. Boothroyd, Design for Manufacture and Assembly, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 676–686.

[10] G. Boothroyd, *Assembly Automation and Product Design*, Marcel Dekker, 1992.

[11] D.A. Gatenby, Design for "X"(DFX) and CAD/CAE, *Proceedings of the 3rd International Conference on Design for Manufacturability and Assembly*, 6–8 June 1988 (Newport, RI).

[12] P.J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill, 1988.

[13] L.A. Ealey, *Quality by Design: Taguchi Methods and U.S. Industry*, 2nd ed., ASI Press and Irwin Professional Publishing, 1994.

[14] W.E. Deming, *Quality, Productivity, and Competitive Position*, MIT Center for Advanced Engineering, 1982.

[15] W.W. Scherkenbach, *The Deming Route to Quality and Productivity: Road Maps and Roadblocks*, Mercury Press/Fairchild Publications, 1987.

[16] W.E. Deming, *Out of the Crisis*, Massachusetts Institute of Technology, 1986.

[17] D.H. Stamatis, *TQM Engineering Handbook*, Marcel Dekker, 1997.

[18] C.O. Smith, *Introduction to Reliability in Design*, McGraw-Hill, 1976.

[19] C.O. Smith, Reliability in Design, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 87–95.

[20] G.E.P. Box, W.G. Hunter, and J.S. Hunter, *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, 1978.

[21] C. Lipson and N.J. Sheth, *Statistical Design Analysis of Engineering Experiments*, McGraw-Hill, 1973.

[22] J.D. Hromi, "Some Aspects of Designing Industrial Test Programs," Paper 690022, Society of Automotive Engineers, Jan 1969.

[23] W.G. Cochran and G.M. Cox, *Experimental Designs*, John Wiley & Sons, 1950.

[24] D.R. Cox, *Planning of Experiments*, John Wiley & Sons, 1958.

[25] G.E.P. Box and J.S. Hunter, The 2^{k-p} Fractional Factorial Designs, *Technometrics: Part I*, Vol 3 (No. 3), Aug 1961, p 311–351; *Part II*, Vol 3 (No. 4), Nov 1961, p 449–458.

[26] Epstein and Sobel, Life Testing, *J. American Statistical Association*, Vol 48 (No. 263), Sept 1953.

[27] E. Rabinowicz, R.H. McEntire, and R. Shiralkar, "A Technique for Accelerated Life Testing," Paper 70-Prod-10, American Society of Mechanical Engineers, April 1970.

[28] J.C. Conover, H.R. Jaeckel, and W.J. Kippola, "Simulation of Field Loading in Fatigue Testing," Paper 660102, Society of Automotive Engineers, Jan 1966.

[29] A.H. Bowker and G.J. Lieberman, *Engineering Statistics*, Prentice-Hall, 1959.

[30] A. Hald, *Statistical Theory with Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 1952.

[31] E.B. Haugen, *Probabilistic Approaches to Design*, John Wiley & Sons, 1968.

[32] N.L. Johnson and F.C. Leone, *Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences*, Vol I, John Wiley & Sons, 1964.

[33] "Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods," E177, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM.

[34] S.W. Rust and R.C. Rice, Statistical Distributions, *Mechanical Testing*, Vol 8, *ASM Handbook*, ASM International, 1985, p 628–638.

[35] N.L. Johnson and S. Kotz, *Discrete Distributions*, Houghton-Mifflin, 1969.

[36] N.L. Johnson and S. Kotz, *Continuous Univariate Distributions—I & II*, Houghton-Mifflin, 1970.

[37] W. Weibull, A Statistical Representation of Fatigue Failures in Solids, *Acta Polytech., Mech. Eng. Ser.*, Vol 1 (No. 9), 1949.

[38] K.E. Olsson, Weibull Analysis of Fatigue Test Data, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, Vol 10, 1994, p 437–438.

[39] *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*, MIL-HDBK-5G, Change Notice 1, 1 Dec 1995.

[40] M.G. Natrella, *Experimental Statistics*, National Bureau of Standards Handbook 91, 1 Aug 1963.

[41] J.F. Lawless, *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, John Wiley & Sons, 1982, p 452–460.

[42] R.B. D'Agostina and M.A. Stephens, *Goodness-of-Fit Techniques*, Marcel Dekker, 1987, p 123.

[43] R.C. Rice, Statistical Aspects of Design, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 72–86.

[44] C.O. Smith, Human Factors in Design, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 126–130.

[45] M.S. Sanders and E.J. McCormick, *Human Factors in Engineering and Design*, 7th ed., McGraw-Hill, 1993.

[46] *Ergonomics: International Journal of Research and Practice in Human Factors and Ergonomics*, Taylor and Francis.

[47] C.O. Smith, Safety in Design, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 139–145.

[48] T.A. Hunter, *Engineering Design for Safety*, McGraw-Hill, 1992.

[49] W. Hammer, *Product Safety Management and Engineering*, Prentice-Hall, 1980.

[50] W. Hammer, *Product Safety Management and Engineering*, 2nd ed., American Society of Safety Engineers, 1993.

第3节 材料选用的要素

工程材料的选择就是一种要求在一些设计要素之间进行互动判别的整合过程，这些要素包括材料性能、制造和加工特征以及在前面已阐述过的设计依据等。为某一特定用途而选择某种材料所提的理由往往无外乎：①该用途一直就使用这种材料；②材料的性

能对路。但它们当作该用途的考虑出发点或者甚至是仔细分析时的依据都是没有道理的。从材料在特定应用中，作为一般性使用所收集的经验应该是有用的信息，然而这种信息本身并不能作为选择材料的判断依据。每一种用途都有其首选材料，而特定材料又都有其可靠市场的这种时代已经过去了。在文献里经常提到的“性能”一词都含有材料本身所固有的意思。然而与之相反，一种性能应该认为是材料对于所承受的一系列工况条件的一种响应。还必须认识到，这种性能应该是材料以最终所能具有的，并已经过处理的形式而存在。如同参考文献[1]所汇总的手册、标准组织、计算机数据库以及其他一些材料信息源中，以表格形式所列的性能数据都是很有用的；但是这些信息必须审慎地加以使用，并且必须是对应于特定的用途。

无论是否为特定的专家，涉及硬件设计的每一位工程师(基本上也包括所有的工程师)总是离不开为设计选择适当的材料(或材料的组合)。除非作为试制性产品，否则仅仅说明元器件的材料是“钢”、“铝”或“塑料”显然是不够的。而且，工程师应当将其注意力、知识和经验都集中到如表1.3-11所示的材料选择的一般性要素上。显然，以上所述与表1.3-2～表1.3-4所列的设计要素是不可分割并相互交织的。

表1.3-11 材料选择的一般要素

功能要求和制约条件
材料性能(表1.3-12)
制造工艺依据
可加工性(表1.3-12)
设计造型
可用及其代用的材料
材料在使用中的腐蚀和劣化问题
热稳定性
特殊需要关注的性能
- 高密度
- 高刚性-重量比
- 低熔点
- 特殊的热膨胀性能
- 电导率/超导率
- 耐磨性
- 生物适应性

成本

原则上说，可以把工程设计的目标特性作为所有这些变量的函数，并以一个数学表达式来表述，然后为了评估分别对每一个关键变量进行微分，并且对所列的微分方程求解，以便求得最佳解。尽管这个原理是对的，然而实际情况并非如此简单，它只是给设计人员的操作提供一种基本思路。在一些情形里，标准的、现成可用的元器件的成本远比通过优化的、非标设计的要低得多，而两者的有效性还是很接近的。

材料性能

一种材料的使用效能或功能特征主要通过其物理、力学、热学、电学、磁性和光学的性质来表征。材料的性能就是存在于材料的基本组织、成分与零件使用效能之间的相互联系(见图1.3-16)。

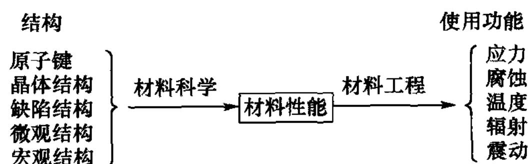


图1.3-16 材料性能在材料选用中的作用

材料工程师的一个重要作用就是帮助设计人员在材料性质与被设计的零件或系统功能之间实现有意义的结合。对于大部分的机械系统而言，其效能并不仅仅取决于单一的性能而是取决于各种性能的结合。

力学性能

在选择材料时，常问的一个问题就是强度是否适应承受由使用载荷所引起的应力。虽然初始的选择依据往往是强度，但是也可以是韧性、耐腐蚀性、电导率、磁学特性、热导率、相对密度、或如表1.3-12所列的其他性质。例如居住区的供水系统，因其水压较低，故最好是选用强度较差而价格稍贵一些的铜管，而不是强度较高的钢管。钢管是以分段供货的，在拐弯处用带螺纹的弯头连接；而铜管是以盘条供货的，在拐弯处很容易弯曲加工。于是，其较低的安装成本就可以抵消较高的材料成本。另外，由于相对较低的水压对于铜管的强度来说也是适宜的，而对于强度更高的钢管来说倒是不必要的了。再进一步，如遇上冰冻，铜更易屈服而不至于爆裂；而且在美国的许多地区铜比钢对于地方水质的耐腐蚀性也更强一些。一般说来，作为选择材料的主要依据通常并非只取决于一种性能(如强度)，而是多种性能、制造特性和成本的某种结合。

抗拉强度。材料承载能力一般都是以其抗拉强度来衡量和广为通报的。然而将抗拉强度直接应用于设计问题是极为困难的。首先，按照定义“抗拉强度”

表 1.3-12　材料选用过程中必须考虑的材料性质

物理性能	饱和磁化强度	凹　槽	熔化比热
晶体结构	转变(居里)温度	腐蚀疲劳	耐火性
原子重量	磁致伸缩	滚动接触	化学性能
密度	核性能	微动	电化序位
熔点	半衰期	夏比转变温度	电锈蚀
沸点	有效截面	断裂韧度(K_{Ic})	腐蚀和劣变
蒸汽压	稳定性	高温特性	气氛
粘度	力学性能	蠕变	淡水
孔隙率	硬度	应力断裂	咸水
渗透性	弹性模量	阻尼性质	酸
反射率	拉伸	磨损性质	高温气体
穿透率	压缩	划伤	紫外线
光学性质	泊松比	擦伤	氧化
尺寸稳定性	应力—应变曲线	侵蚀	热稳定性
电学性能	屈服强度	气蚀	生物稳定性
电导率	拉伸	剥落	应力腐蚀
电阻率	压缩	弹道冲击	氢脆
介电常数	剪切	热学	液压渗透率
霍尔系数(效应)	极限强度	热导率	加工性能
超导温度	抗拉	比热容	铸造性
磁学性能	抗剪	热膨胀系数	淬透性
磁化率	抗压	溶解潜热	成形性
磁导率	疲劳性质	辐射率	切削性
矫顽磁力	光滑	吸热率	焊接性

指的是试件在失效之前所能承受的最大应力(根据初始横截面积)，并且发生在塑性不稳定性刚开始的时候。于是任何元器件被加载并达到它的抗拉强度时，很可能立即发生断裂。其次，如果按照极限强度值的一部分值进行设计，将会产生一个问题就是作为这个部分值为多少才是合适的强度并且是安全的，同时材料又能得到充分的利用。最后，在抗拉强度与材料的其他性能，如硬度以及在一定的循环周期里的疲劳强度之间只有一种粗略的相关性，而抗拉强度与如抗裂纹扩张性、抗冲击性或比例极限之类的性质之间则更没有任何相关性。

屈服强度。代表会发生永久变形的最小可测试到的应力。这个数据对于估算成形加工所需要的力是很有必要的。屈服强度对于考虑单一作用的超载所造成的影响也是有用的，大部分的结构设计都必须确保在可预见的过载作用下都不会超过其强度极限值。

硬度。这是又一个广泛用于测试的材料性质，而且对于估算材料的耐磨性和钢的强度近似值都是非常有用的。它也是最为广泛地被作为热处理的质量保证而使用。然而硬度与其他力学性能之间或硬度与材料在使用过程中的表现之间也只是有一种粗略的相关性。

伸长率。金属的塑性通常是以拉伸试验中所发生试件长度的伸长或截面缩小的百分比来度量，也是材料选用时常被考虑的一个重要因素。可以这样假设：如果金属在拉伸试验中有着一定的最小伸长，那么在使用时就不会发生脆性断裂的失效。还可以假设：如果有一点塑性是好的，则大塑性就更好了。这两种假设都不是很精确的。通常认为极具塑性的金属都会在诸如疲劳、应力腐蚀或低于从塑性至脆性的转变温度下使用的条件下，以一种看似脆性的方式断裂。然而在具体使用条件下，多大的伸长率是实际可利用的，并且如何最好的进行测试都是非常有争议的。对于实际可供利用的伸长率(如材料吸收发生在大型结构中内部移动的能力，这对于平衡在结构中所有各部分之间的载荷是必要的)的若干种估计都将拉伸试验的伸长率介于1%~2%。更大的伸长率只是表明结构具有较大程度上可延伸的永久变形可能性。例如由于飞机机翼的空气动力学效率的降低只允许其承受1~1.5倍的变形。工艺所要求的塑性远远超过其实际使用所允许的塑性。例如钢板常必须具有相当的塑性，这种塑性大大超过它作为成品在使用时所允许的塑性，但是尽管如此，其塑性也只需足够其零件成形时所要求的。

制造工艺的考虑因素

在前面章节讨论了关于材料在使用过程中，既能适当发挥其功能又不至于失效的能力。但是首先零件必须能得以制造出来，也就是它是可生产的。材料的选用过程中，还应该有一些其他性能和生产性方面的考虑。作为一项可生产的设计，其结构形式不应当在加工方面凭空增添一些不必要的困难。

本节将扼要地阐述一些影响材料选用和加工工艺之间相互关系的关键性要素。参考文献[2]提供有关

不同制造工艺特征的详细内容。

材料要素

从非常一般的意义上说，材料一旦选定也就在一定范围里决定了用该材料制造零件所能采用的工艺方法。在图 1.3-4 中示出了各类普通的制造工艺，而表 1.3-14 列举了针对不同金属和塑料最为常用的制造工艺。材料的熔点、抗变形能力以及伸长率都决定了这种材料与加工工艺之间的关系。有些材料因为太脆而无法进行塑性变形，还有些材料由于太容易起反应而不能铸造或导致焊接性很差。

材料的熔点决定了所能采用的铸造工艺。铸造工艺中的大部分方法都能应用于低熔点金属，然而随着材料熔点的升高可采用的铸造方法越来越有限。阿希比（参考文献[3]）指出铸件大小（重量）和材料熔点之间的关系（见图 1.3-17）。该图表明不同的铸造和造型工艺所能使用的铸件大小范围，以及作为高熔点材料可适用的工艺方法数量是如何急剧减少的。这也是涉及铸造、金属压力加工、聚合物材料制造、粉末冶金制造和切削加工的多种工艺选择图中的一种，它是由阿希比在参考文献[3]里提出的在方案设计阶段作为选择制造方法的一种辅助手段。

图 1.3-17 铸件的阿希比工艺图。图中大小以重量 W 计，它可以通过密度 ρ 转换为体积，或者近似地表示成线性度量 L，如图中右边的坐标轴所示。$L=(W/\rho)^{1/3}$。摘自参考文献[3]

同样，屈服强度或硬度对于成形工艺和切削加工也有所限制。锻压和轧制的载荷与屈服强度有着密切的关系，而刀具寿命(刀具因载荷而产生高温)则随被加工材料的硬度增加而成倍缩短。这些加工工艺最终受制于材料的可加工性，见本章中“制造工艺性”一节。

形状要素

每一种工艺都与其生产的零件形状相关。在选择工艺时，首先要决定的是能否制造出所要求的形状。右表是形状的简单分类。

二维(2D)	产品的轮廓沿其长度方向保持不变。如线、管、铝箔。有许多二维产品被作为原材料应用于制造三维形状零件的工艺上
三维(3D)	产品的轮廓沿三个轴向的方向都有变化。大部分的产品都是三维的
板状	具有不变的截面厚度，其厚度与另外两维方向上的尺度相比要小得多
块状	具有复杂的形状，常没有什么对称性。实心：没有明显空洞；空心：有明显的空洞

还要确定所选工艺能否适应零件的各种形状，如带有下部凹槽或凹角的形状，或者在沿与主模具运动垂直的方向上带有局部结构的零件。对于形状及其与工艺之间的关系方面更深入的考虑可以参阅参考文献[2]。

工艺要素

主要加工工艺要素包括单件加工时间、质量、柔性度、材料利用率及操作成本。表1.3-13给出了作为评估这五方面工艺特征的评判系统，它可以用于对表1.3-14中所列的一些最普通的制造工艺进行评判。

表1.3-13　评价制造工艺的级别

级别	操作周期时间	质　　量	柔 性 度	材料利用率	运 行 成 本
1	>15min	质量差，平均可靠性	互换特难	损耗>100%成品零件	机器和工装成本相当大
2	5~15min	质量平均	互换难	损耗50%~100%	机器和工装成本大
3	1~5min	质量平均至良	互换和调整时间平均	损耗10%~50%	机器和工装成本较低
4	20s~1min	质量良至优	互换快	损耗<10%成品零件	工装成本低/设备很少
5	<20s	质量优	不需要调整时间	无有效损耗	无调整成本

注：评价说明：组别1，最差；组别5，最好。
引自参考文献[4]。

表1.3-14　常用制造工艺的评价特征

工　艺		形　状	周期时间	柔 性 度	材料利用率	质　　量	设备工装成本
铸造	砂型铸造	3D	2	5	2	2	1
	蒸汽发泡	3D	1	5	2	2	4
	熔模铸造	3D	2	4	4	4	3
	金属模铸造	3D	4	2	2	3	2
	压力模铸造	3D 实心	5	1	4	2	1
	挤压铸造	3D	3	1	5	4	1
	离心铸造	3D 空心	2	3	5	3	3
	注射模压	3D	4	1	4	3	1
	反应注射模压(RIM)	3D	3	2	4	2	2
	压缩模压	3D	3	4	4	2	3
	旋转模压	3D 空心	2	4	5	2	4
	单体铸造，接触模压	3D	1	4	4	2	4

（续）

工艺		形状	周期时间	柔性度	材料利用率	质量	设备工装成本
成形加工	锻造，开式模	3D 实心	2	4	3	2	2
	锻造，闭式热模	3D 实心	4	1	3	3	2
	薄板金属成形	3D	3	1	3	4	1
	轧制	2D	5	3	4	3	2
	挤压	2D	5	3	4	3	2
	超塑成形	3D	1	1	5	4	1
	热成形	3D	3	2	3	2	3
	吹模压	3D 空心	4	2	4	4	2
	压制和烧结成形	3D 实心	2	2	5	2	2
	等静压冲	3D	1	3	5	2	1
	注浆成形	3D	1	5	5	2	4
切削加工	单点切削	3D	2	5	1	5	5
	多点切削	3D	3	5	1	5	4
	磨削	3D	2	5	1	5	4
	电火花加工	3D	1	4	1	5	1
连接	熔焊	全部	2	5	5	2	4
	硬钎焊/软钎焊	全部	2	5	5	3	4
	粘结	全部	2	5	5	3	5
	紧固连接	3D	4	5	4	4	5
表面处理	喷射硬化	全部	2	5	5	4	5
	表面淬火	全部	2	4	5	4	4
	CVD/PVD	全部	1	5	5	4	3

注：2D，二维；3D，三维。评价说明：1，最差；5，最好。

引自参考文献［5］。

单件加工时间。一旦工艺被确定下来并且能正常操作，单件加工时间就是加工单个零件所需用的时间。单件加工时间的倒数就是生产率。

质量。就是包括所有描述产品适合于使用的程度的术语。这个特征涵盖了表面粗糙度、符合制造公差的程度、产品的综合性质（是否有气孔、孔隙、裂纹和夹杂物等）和形成的可控性性质的能力（显微组织的控制）。

柔性度。制造的柔性度指的是工艺用于生产不同产品或同种产品的变型的适应程度。在产品的个性化变得越来越重要的时代里，这个特征也日益显示其重要性。柔性度在很大程度上受变换和调整工装需要的时间所影响。

材料利用率。这是对于除了产品本身所要求的材料以外，被加工去掉的材料数量的衡量。大部分的切削加工工序会产生60%～80%的切屑。净成形锻造和射压造型正是另一极端情况。当材料成本在产品成本中所占的份额越大时，材料的利用率就显得越加重要。

运行成本。它包括工厂、机器和工装成本的投资，以及启动和运行的劳务成本。工艺选择常受适用设备的制约，特别是能否经济地实现所需要的工艺。在任何有关生产的情况里，都要为能否将生产外包给有资质的承包商做出适当的决定。

制造工艺性

制造工艺性或制造的容易性就是描述借助不同的制造工艺对金属进行加工的能力。其含义中具体包括成形性、加工性、铸造性和焊接性等术语。

无论如何，产品设计都应该使所用的材料只需采用方便的而不必要求特殊条件的制造工艺便可以进行加工。对于能以若干种方法加工的材料，万一出现不可预料的情况而无法使用主要的加工方法，这时要便于采用备用的加工方案。

与生产有关的问题，如可用于制造元器件的设备及其制造能力等都与制造工艺性直接相关，这里还有一个要求生产批量的问题。如果需要复制生产数千个零件，那么使用具有高额成本的模具和专用设备相对其生产数量在经济上是合算的。如果只需要几个零件，那么采用相对昂贵的库存现有材料用手工进行制造比起使用较为便宜的材料且更为复杂的加工方法进行制造要来得便宜。尽管如此，还是应当对产品成本和所拟定的各种加工方法的生产数量之间的关系进行工程估算。

制造工艺性和力学性能也是互动的，而且相互间往往呈反向作用。强度的提高常需要增加碳和合金元素的含量，然而其焊接性和切削性也就因此降低。虽然大部分的材料都能焊接，但是较高强度的材料一般要求采用特殊的技术；为此设计人员必须了解，为了满足零件的焊接要求往往需要增加其成本。在某些情况里，也许根本没有实际可行的办法能使基础金属因焊接而失去的强度得以恢复。通过增加硫和铅的含量能使切削性得到提高，而其疲劳寿命却会因此降低。

在本章后面将重点阐述导致或避免在生产过程中产生缺陷的材料特征。在选择制造工艺时，材料的某些特征被认为是固有的，例如在大气中熔化会发生强烈反应的金属，就不能选择在空气中铸造。正像后面将要阐述的，还有更多的细节问题以及材料选择试验需要予以考虑。

铸造性

所谓铸造性就是如何将液态金属的性质与其固化特征有机地结合起来，以生成精确和完整的铸件。影响铸造性的因素有流动性、收缩性和抗热开裂性。

流动性。液态金属自由流动和充满模型空腔的能力。因为熔化了的金属的粘度是非常低的，其流动性更多地是由金属和模型两者的固化动力学所决定的。高表面张力的液态金属将减少其流动性。熔化金属表面形成的氧化膜对流动性也会明显地产生负面影响。不溶性的夹杂物也会降低流动性。合金的固化形式是很重要的。流动性随材料的固化温度范围增高而降低，反之亦然。于是凝固温度范围小的纯金属和低共熔点合金具有较高的流动性。流动性通常是通过将凝固前的金属倒入螺旋形的狭窄型腔里，然后测量其渗透的长度来进行评价的。

收缩性。这是一种重要的铸造因素，它决定了合金是否有形成缩孔的倾向性。遗憾的是对于缩孔还没有标准试验方法。有关如何在铸件设计中控制缩孔的讨论可参阅第2篇第2章中的“铸造”一节。

抗热开裂性。这是一种合金在热脆温度范围里承受因冷却收缩而引起应力的能力。

铸造性是以上三种因素的综合性质。一种分析方法就是分别对上述每一种重要因素按照从1到5的级别对合金的铸造性做出评价，在此过程中还要对各因素的重要性进行加权，并且使用矩阵决定法为铸造合金确定铸造性的级别(参考文献[6])。表1.3-15所示是该方法在金属合金上的典型应用，分别对铸造性、焊接性和切削性做出相对评价。请注意，它们是对于一类合金所作的一般性总体评价。每一个类别中的不同合金相对于其特定的工艺特征又有相当大的差异。

表1.3-15　铸件及其铸造性、切削性和焊接性的评价方法的典型应用

铸件合金	应　用	铸造性	切削性	焊接性
铝	活塞、离合器壳、排气歧管	1~2	1~2	3
铜	泵、阀、船用螺旋桨	1~3	1~2	3
灰铁	发动机缸体、齿轮、制动盘和鼓、机架	1	2	5
镁	曲轴箱体、变速箱体	1~2	1	2
可锻铸铁	农业和建筑机械、重型轴承、铁路轨道	2	2	5
镍	汽轮机叶片、化工厂用泵/阀零件	3	3	3
球墨铸铁	曲轴、重载齿轮	2	2	5
钢(碳、低合金)	模架、重载齿坯、机车车轮	3	2~3	1
钢(高合金)	汽轮机机体、泵/阀零件、碎矿机齿板	3	3	1
白口铸铁	球磨机磨盘、喷丸机喷嘴、制动块、粉碎机	2	4	4
锌	门把手、散热器护栅、化油器体	1	1	5

注：1：优，2：良，3：一般，4：差，5：很差。
摘自参考文献[7]。

压力加工性和成形性

必须认识到它们是两种塑性变形过程。在三维或块形变形的工艺中，材料的加工是沿着三个主方向而变形的。这时是以材料的断裂作为其变形极限的主要依据，以这种方式来描述材料的压力加工性是很重要的。在二维或薄板成形加工工序中，是以造成褶皱、过薄或断裂作为其变形极限的，因此也要考虑到表述材料可成形性的方式。

压力加工性。它是一种不仅仅取决于材料的抗断裂性(塑性)复杂技术的概念，还取决于由模具的几何形状、工件的几何形状以及润滑条件所决定的具体条件(应力状态)；材料的压力加工性越强，其变形也就越大，和/或发生断裂之前的形状也可以更复杂一些。材料具有低流动应力(屈服强度)将有助于提高其制造的容易程度，因此，必须通过工艺装备作用于模具的力和应力将也是比较低的。因为流动应力是随着温度的提高而降低的，因此在高温下可以进行更多金属的塑性变形(热变形加工)。

使压力加工性受到制约的裂纹形成通常也是塑性断裂的一种形式。在低于熔点一半的温度(按热力学温度刻度)里，它是一种普通的凹陷破裂的模式；但是在较高温下，将因为晶界滑移或空穴而开始发生断裂(参考文献[8])。当变形被局限在一个较为窄小的区域时，也会产生压力加工性的问题。在工件与工装之间形成的一个金属死角而导致流动的局部化，这是因为这个地方的润滑性很差或者因为模型比工件更冷所致。另外，还会因为诸如加热时导热性差、晶粒粗化或球化作用引起的内部结构不稳定而造成局部化流动。

材料的加工性并不是一种一成不变的材料性质。变形工艺的几何形状在工件内形成的应力状态会极大地影响其压力加工性。一般作为修正应力状态的压力加工性参数，即β，可由下式给出(参考文献[9])：

$$\beta = \frac{3\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (1.3\text{-}3)$$

式中，σ_m 为应力的均值或流体静态分量：

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1.3\text{-}4)$$

并且，有效应力 $\bar{\sigma}$ 为：

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.3\text{-}5)$$

图 1.3-18 所示是相对于β值画出的应变对应于断裂的曲线。该曲线是由三个基本的力学性能试验来确定的：拉伸、扭曲和压缩。在表 1.3-16 中分别给出其中每一种试验的适当参数值。图 1.3-18 还以压缩应力状态的级别表示最为常见的金属三维变形过程所在的区域。

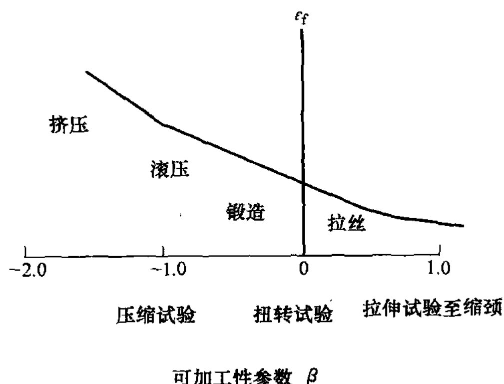


图 1.3-18 应力状态对致使断裂的应变的影响。摘自参考文献[8]

表 1.3-16 压力加工性参数，β 的评价

试验	主 应 力	有效应力	平均应力	β	应变-断裂测量值
拉伸	σ_1；$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	σ_1	$\frac{\sigma_1}{3}$	1.0	$\varepsilon_f = \ln\frac{A_0}{A_n}$缩颈处
扭转	$\sigma_1 = -\sigma_2$；$\sigma_3 = 0$	$\sqrt{3}\sigma_1$	0	0	$\varepsilon_f = \frac{r\theta}{\sqrt{3}L}$
压缩	$-\sigma_1$；$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	σ_1	$-\frac{\sigma_1}{3}$	−1.0	$\varepsilon_f = \ln\frac{A_f}{A_0}$

评价自由表面的压力加工性的最有效和最有用的方法之一就是断裂轨迹图(见图 1.3-19)(参考文献[10])，其图形表示造成断裂的自由表面应变轨迹(一个为拉

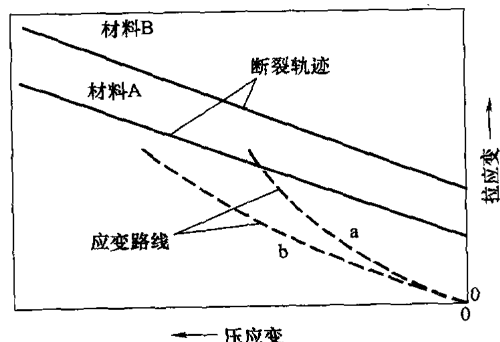


图 1.3-19 三维变形过程的可加工性的示意图。应变路线 a 将导致材料 A 失效。两条应变路线均可适用于材料 B 的成形。摘自参考文献[10]

伸，另一个为压缩）。这些都是试件经过镦粗压缩和弯曲试验而得到的。对于许多金属，其断裂轨迹都是斜率为 -½的直线。为利用这些断裂图，将在变形过程中不断扩张的应变估算值叠加在断裂轨迹图上。如果零件加工的最终应变线位于材料的断裂线之上，那么可以预料零件将会发生失效。以图 1.3-19 所示说明可以通过向具有较高的压力加工性的材料 B 的转变，或者通过工艺条件（润滑、模具设计或功能设计）的改变来降低表面拉伸应变，例如应变路线 b。

为确定三维变形过程已设计制定了大量的可压力加工性试验方法（参考文献[11]和[12]）。除了拉伸、镦粗压缩、弯曲和扭转的基本试验之外，还有如平面应变压缩、半宽凹槽、环形压缩，以及如楔形锻造、边冲和凹槽试棒镦粗的可锻性试验等。其中一些试验将在本手册（下册）第5篇第4章中作进一步阐述。

成形性。所谓成形性一般指的是薄板塑性变形到某一形状的时候，它能保持其结构整体性的能力。其失效常以撕裂、翘曲和褶皱，或延伸过薄的形式发生。从成形性的角度来看，一种理想的材料应该是：

- 在薄板上均匀地分布应变（高 m）；
- 在不发生缩颈和断裂的前提下，达到高应变的限度（高 n）；
- 能承受面内的压应力而不发生褶皱；
- 能承受面内的切应力而不发生断裂；
- 从模具里脱出后仍能保持零件形状；
- 保持表面光滑而不发生表面破坏。

应变的分布是由拉伸试验测得的三种材料性质决定的。应变硬化指数（*strain-hardening exponent*）即为大家所熟知的 n 值，由式(1.3-6)表达：

$$n=\frac{(\ln\sigma)}{\mathrm{d}(\ln\varepsilon)} \tag{1.3-6}$$

式中，σ 为实际应力，ε 为实际应变。应变率敏感度（*strain-rate sensitivity*）为大家所熟知的 m 值，由式(1.3-7)表达：

$$m=\frac{\mathrm{d}(\ln\sigma)}{\mathrm{d}(\ln\dot{\varepsilon})} \tag{1.3-7}$$

塑性应变率（法向平面内各向异性）或 r 值，表达如下：

$$r=\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}=\frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \tag{1.3-8}$$

式中，ε_w 为拉伸试件在宽度方向上的实际应变，ε_t 为其在厚度方向上的实际应变。

r 值是当材料经受宽度减小时，其抵抗变薄能力的一种度量。高 r 值代表了材料具有很好的拉深特性。高 n 值和高 m 值说明材料在延伸过程中具有很好的成形性，因为它们使应变分布均匀化，而对于拉深性的影响则很小。

通过薄板在其平面内所承受的不同的最大和最小应变比，画出局部发生变薄（缩颈）和损坏时的应变比轨迹图，以此建立薄板金属的成形极限图（见图 1.3-20）。在左边的圆圈变形为椭圆形，其应变条件代表了拉伸条件；而右边的圆圈在拉伸条件下变形为更大的圆。当最小应变为0时，平面应变条件得以建立。薄板的成形极限图可以与零件的试制结合起来使用，用于确定材料到达失效的接近程度和确定如果要使材料远离其失效条件，则应当如何调整其润滑和模具参数。用电化学的刻蚀方法在薄板表面刻满圆圈，并呈方格排列。当板材变形时，呈方格排列的圆圈就随之变形，于是就可确定各关键点的最大和最小应变比值。把这些应变画在图 1.3-20 上就可看出材料到达失效的接近程度。

现在已经开发了许多模拟金属薄板成形的试验（参考文献[13]）。奥尔森和埃里森杯突试验和半球形圆拱试验都用于测试其延伸量，而斯韦福特杯突试验测试其拉长量。斯韦福特的圆底试验和福库伊圆锥杯突试验则包括延伸与拉长两者的结合。有关这些试验更详细的内容可参见本手册（下册）第5篇第4章。

切削性

切削性就是材料被切削时的相对难易程度。如果刀具的磨损少，则说明材料具有很好的切削性，切削力也很小，其切屑被断为小段而不是呈长条的缠结状，而且其表面粗糙度也为合格。这仅仅说明一个把切削性定义成为一种颇具特征性的材料性能的问题。而切削性更是一个系统的性质，它所取决的工件材料还要加上切削刀具材料及其几何形状、切削工序的种类，以及切削时的工况条件，诸如速度、进给、背吃刀量、切削液性质和机床刚性等。作为可以用于切削性的一般性判别，工件材料越硬，其切削性就越差。但是即便在其低硬度的情况下，由于材料软而又呈胶质性，以致在产生切屑的同时形成切削瘤并使切削性变差，最后导致切削加工难以继续。对于材料具有良好切削性的要求是随切削工序的不同而变化的（表 1.3-17）。

切削性的指数及其评定常常在一定切削条件下作为一种定性和相对的方法来衡量材料的切削性能。这种概念还是在20世纪初，高速钢刀具得到广泛应用的时候就提出来了。用高速钢刀具以 180ft/min 的切削速度（sfm）车削 B1112 再硫化钢，以此得到的刀具

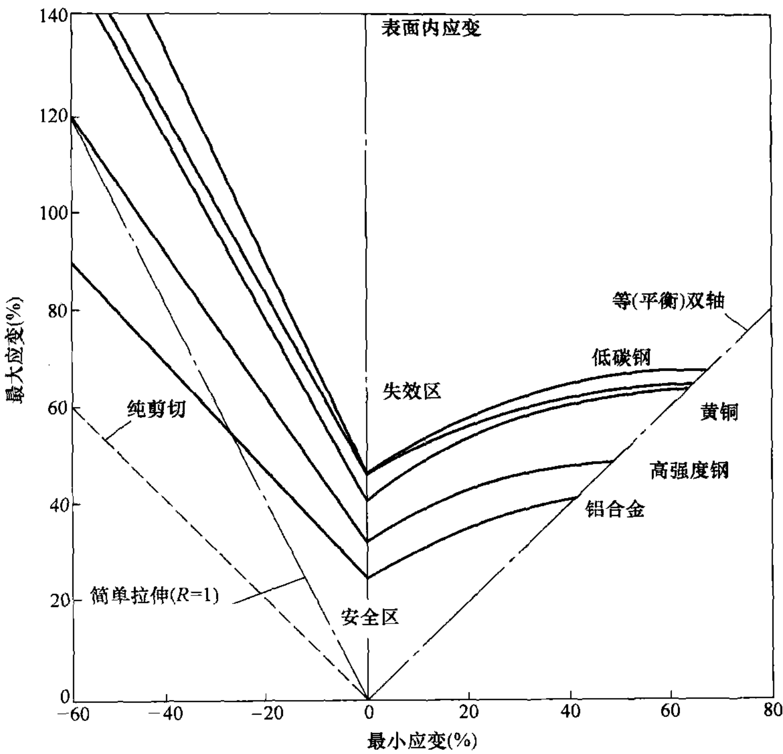


图 1.3-20 不同金属板材的典型成形极限图，将成形的零件中的最为关键处的最大(总为正的)和最小应变结合点标在该图上。如果该结合点位于该金属板材的成形极限图的上面，则将会发生失效

表 1.3-17 根据工件的切削性难度依次递减而列举的常用切削工艺

内拉削	铣削
外拉削	浅孔钻
攻螺纹	刨削
齿轮轮齿加工	单点车削
深孔钻	锯
镗孔	磨削
用成形刀具加工螺纹	
高速、小进给螺纹切削加工	

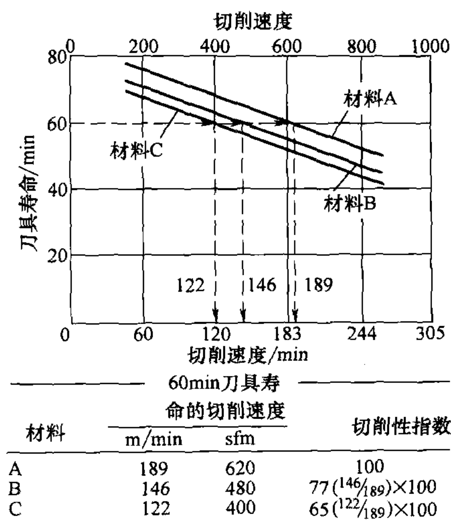
引自参考文献[14]。

寿命标定为切削性的评定值 100。假设这时刀具可使用 60min，而切削另一种材料可使用 40min，那后一种材料的切削性评定值为(40/60)100 = 67。由于切削速度的小变化会导致刀具寿命的大变化，因此更实用的办法是将能在一定的时间间隔(通常取 60min)里造成刀具失效的切削速度作为其材料切削性的度量。由此引入泰勒刀具寿命方程，即切削速度乘以刀具寿命的指数次幂等于常数，($vT^n = C$)。图 1.3-21 所示是其曲线和确定切削性指数的方法。

表面粗糙度是评价切削性的另一个重要指标。在给定的一系列条件下表面粗糙度越高，材料的切削性也越好。同样，有时也通过切削力试验来测试在给定条件下的进给力。然而切削性最基本的测量方法还是切削单位体积的材料所消耗的能量(参考文献[16])。表 1.3-18 列举了一些能耗的数值。有关切削性试验的详细内容可参见参考文献[14]、[15]和[18]。

显微组织会对切削性产生重要影响。球化碳化物比其片状珠光体有更好的切削性。通过加入少量的硫、磷或钙可以有效地控制钢里的夹杂物。硅铝铸造合金，即 A390 就是制造工艺对切削性的影响的一个例证。用常规的压铸模制造的铸件比用砂模制造的具有更好的切削性。这要归功于由其较大范围的不同冷却率所生成的显微组织。由压铸工艺产生的组织非常致密并均匀分布的硅颗粒，而砂型铸件里含有较大的且分布不够均匀的硅颗粒。

最后，还要知道切削性的数据是相当离散的。以 B1112 钢为例，在其牌号规定的化学成分范围内切削



材料	60min刀具寿命的切削速度 m/min	sfm	切削性指数
A	189	620	100
B	146	480	77(146/189)×100
C	122	400	65(122/189)×100

图 1.3-21　根据泰勒方程，刀具寿命与切削速度之间的关系。表中所示是求得切削性指数的。引自参考文献[15]

表 1.3-18　切削不同金属和合金，单位体积所要求的近似能耗

材料	硬度 HB	单位体积的能耗①/[(W/s)/mm³]
铝	50～100	0.55
铝合金	100～150	0.65
铸铁	125～175	0.87
	175～250	1.3
碳钢	150～200	1.3
	200～250	1.7
	250～300	2.2
合金钢	200～250	1.7
	250～300	2.2
	300～350	2.8
	350～400	3.5
铜	—	1.5
黄铜	100～150	1.7
青铜	100～150	1.7
高温合金	—	3.3～8.5
钛合金	—	3.0～4.1
耐热金属	—	3.8～9.3

① 除以 2.73 可将其转换成单位：$(hp/min)/in^3$。

引自参考文献[16]、[17]。

性指数可以在低于名义值 100 达 20% 到高于其 60% 的范围内变化，这是因为碳、硫与硅的含量总会有些变动所致。一般地说，切削性评定值 5% 以内的变动量可以认为是不显著的和非再现的。

焊接性

作为一种特定金属连接的焊接性，它所表述的是其进行焊接的难易程度及其焊缝的质量和可靠性。所有的金属都至少有一种焊接的方法(表 1.3-19)将它们自身焊接起来，这个过程将在本手册(下册)第 4 篇第 8 章中讨论。控制焊接性的基本要素就是基体金属和作为焊料金属的成分。不相同的金属之间是无法进行熔融焊接的，除非它们具有冶金学上的可溶性。若没有这种可溶性就会形成脆性复合物。焊接性受到诸如焊接金属中的裂纹、疏松以及热效应区(HAZ)里的裂纹这样一些缺陷的影响。钢中的焊接裂纹是由于存在非常少量的氢、在焊缝中形成的马氏体和存在的高残余应力而造成的。由于热脆性，高硫含量的高速切削钢必须有裂纹才能熔焊。淬火钢在焊接时必须特别小心，以防止脆性马氏体的生成。通过预热焊接降低淬火的速率和通过保温加热使所有马氏体进行回火，这些方法都应该是很实用的。为估计淬透性的问题是否可能影响钢的焊接性，可由式(1.3-9)计算碳当量值(CE)：

$$CE = w(\mathrm{C}) + \frac{w(\mathrm{Mn})}{6} + \frac{w(\mathrm{Ni})}{15} + \frac{w(\mathrm{Cu})}{15} + \frac{w(\mathrm{Cr})}{5} + \frac{w(\mathrm{Mo})}{5} + \frac{w(\mathrm{V})}{5} \tag{1.3-9}$$

当钢的 CE 值小于 0.45 时，几乎不会有焊接裂纹，也不需要进行热处理。

焊接质量可通过不同的试验来检验。常利用有焊缝的试件进行拉伸和弯曲试验。不同的落锤试验和断裂韧度试验也常用于试验钢的焊缝。为确定在制造过程中焊缝连接对裂纹的敏感性，现已开发了大量的试验方法。他们分为制约性试验、外加载荷试验和焊道下裂纹试验，还有层状撕裂试验(参考文献[20])。这些试验还要在本手册(下册)第 4 篇第 8 章中详细阐述。

热处理性

对于热处理的满意度就是制作成特定零件的材料，经热处理能达到所需的显微组织、硬度和强度，而不会发生裂纹、变形以及过度的尺寸变化的能力，这也就是材料的热处理性。影响热处理效果的最主要的因素有：材料的再结晶过程、相分解、和/或特征转变，零件的形态和质量，以及热处理的工艺规范。

表1.3-19　特定金属和合金的焊接性

焊接的基体金属	焊接工艺								
	保护电弧焊	钨极气体保护焊	等离子焊	埋弧焊	气体保护	焊条包芯焊	电渣焊	铜焊	气焊
铝	C	A	A	不可	A	不可	Exp①	B	B
铜基合金									
黄铜	不可	C	C	不可	C	不可	不可	A	A
青铜	A	A	B	不可	A	不可	不可	A	B
铜	C	A	A	不可	A	不可	不可	A	A
铜镍	B	A	A	不可	A	不可	不可	A	A
镍银(Cu-Ni-Zn)	不可	C	C	不可	C	不可	不可	A	B
铁									
铸铁、可锻球化的	C	不可	不可	不可	C	不可	不可	A	A
熟铁	A	B	B	A	A	A	不可	A	A
铅	不可	B	B	不可	不可	不可	不可	不可	A
镁	不可	A	B	不可	A	不可	不可	不可	不可
镍基合金									
铬镍铁合金	A	A	A	不可	A	不可	不可	A	B
镍	A	A	A	C	A	不可	不可	A	A
锰铁合金	A	A	A	C	A	不可	不可	A	A
贵重金属	不可	A	A	不可	不可	不可	不可	A	B
钢									
低碳钢	A	A	A	A	A	A	A	A	A
低合金钢	B	B	B	B	B	B	A	A	A
高碳钢和中碳钢	C	C	C	B	C	C	A	A	A
合金钢	C	C	C	C	C	C	A	A	A
不锈钢(奥氏体)	A	A	A	A	A	B	A	A	C
工具钢	不可	C	C	不可	不可	不可	不可	A	A
钛	不可	A	A	不可	A	不可	不可	不可	不可
钨	不可	B	A	不可	不可	不可	不可	不可	不可
锌	不可	C	C	不可	不可	不可	不可	不可	C

注：金属或工艺评价：A，推荐或容易焊接；B，可以，但不是最佳选择或焊接时多加小心；C，可能可用，但限制应用或很难焊接；不可，不推荐或不可能焊接。

①原书中无注释，疑为昂贵之意。——译者注。

引自参考文献[19]。

在为某种应用确定需要取得何种热处理的效果之前，更重要的是要确定热处理的绝对必要性。经济方面的考虑也是相当重要的，由于人们总是自然而然地认为作为零件特别是钢的零件总是要进行热处理的而

往往忽视这种经济性的存在；所以可以通过取消热处理来分析其经济上的可观性。

因为热处理会在零件内产生许多热应力（即使零件没有被淬火），所以设计零件时应该使这种热应力的负面影响降低到最低限度；在淬火过程中零件的热应力会达到最大。设计的基本目标就是要使零件在加热和冷却的过程中，温度的分布要尽可能的均匀。零件必须避免锐角特别是内角，因为他们会造成热应力的集中，从而加重应力对零件的作用。均匀的截面厚度将有利于温度的均匀分布。为设计一个零件使之在热处理过程中产生的热应力最小，通常要选用能满足性能要求的最为经济的材料。

也许最普通的热处理就是奥氏体化、淬火和回火的过程，这也是硬化碳钢和合金钢最为常见的工艺。这个工艺的关键部分就是被硬化的钢制零件必须含有最低含量的马氏体以满足所需要的硬度。换而言之，钢的可淬性也就是当零件被投人介质进行淬火时，必须能生成足够的马氏体含量，当然该介质应当适合于零件的大小、形状及其变形公差。

为了获取一定的材料性能组合，有必要确定其他的热处理工艺，像奥氏体回火、感应淬火、火焰淬火、渗碳淬火或氮化处理。每一种工艺都将钢种的选择限制在一定的范围里，这个限制范围包括碳含量、淬硬性或需要一定量的合金元素。

通常热处理方面似乎很少的改进都会给制造成本带来可观的降低，特别是在通过改进能降低废品率、改用更为便宜的合金，或改善制造工艺程序的情况下。

材料选用的其他主要因素

形状设计。物体的形状部分地取决于其使用要求，而这种要求又是由构成它的材料所承载的。譬如其截面尺寸可以决定材料因作用载荷而承受的应力，所产生的这些应力会由于凹槽效应和截面尺寸的变化而增大。形状设计决定了元器件会不会遭受到特殊损害，如受磨损或在腐蚀性的环境中暴露。它还将决定制造该物体所采用的材料形式。一种长而窄的零件常简单地使用带材或棒料来制作，因为原材料与其加工成的零件有着大致相似的形状。具有高度旋转对称的零件常在车床上车削加工得到，而空心球则可以将两个用平板冲压得到的半球对接而成。

可用和代用材料。一种材料对于某一用途无论有多大的优势，如果这种材料从用途所要求的形状和数量上有困难，那么对该用途来说它也不能算是一种好的选择。由于市场波动引发短缺、矿石/金属供货地的地缘政治不稳定、生产商由于客观或主观上的原因而难以按照要求的供货方式或数量供货以及不同材料的成本发生变化都会构成材料的供应问题。如果一个特定零件是在不同的地方尤其是在不同的国家制造的，将会有更为复杂的问题存在。于是，对于一种用途最好能选择一种以上的材料，若可能再制订一个优先采用的顺序。

有时，用代用材料替代首选但又无法搞到的材料是必要的。在另一些情形里，选择代用材料是因为其在特定情况下的优势。例如，有一个工具制造商曾购进过 AISI1078 和 1086 的碳钢棒料，两者的成分范围互为覆盖。而制造商决定采用 1078，借此减少库存。但更重要的是因为它应用的是更为广泛的钢种，1078 比 1086 生产得也更多，因此便于订购，而且也更容易按期得到供货。

作为压力容器的代用材料必须使其强度稍大于所要替代的材料，然而强度上的少量增加将使壁厚有显著的减小，因此也可以用它制造稍微大一些的压力容器。然而压力容器的设计者必须明白，强度的增加并不能同时把抗断裂能力降低到允许值以下。

要求的产品类型也有可行性的问题。一种只能通过铸造得到的材料，显然不能将其用于拉制管子、挤压、金属丝网或其他型材制品。

使用中腐蚀和劣化。材料根据其使用特性可以被认为具有或不具有抵御腐蚀和劣化的能力。有时，优先采用价廉却需经常更换的元器件，是考虑到它会在短时间里发生腐蚀和劣化；然而在另外一些情况里，则因为会为人员带来很高的潜在危险性或者别的理由而不允许这样做。

当处理腐蚀性介质时，还有一些因素需要考虑，因为对它们的忽视会导致对于腐蚀试验和手册数据的错误理解：

- 试件在某一温度下的简单静态试验中，进行试验，较之如果材料同时还传递热量到腐蚀性介质中或材料和腐蚀性介质之间有较大的相对运动，则它们的腐蚀的方式和速率都会有显著的差别。
- 在试验过程中，若介质被污染，其腐蚀特征也会发生变化。
- 在实验室和实际工况之间，缺少相关性可能是由于在实验室里的溶液体积与实验室里试验材料的表面积之比有限所造成的。
- 腐蚀液面上的空气或蒸汽压力，对于从溶液中解析出的氧气或其他气体的析出量会有相当大的影响。
- 由于能形成保护膜而具有耐腐蚀性的合金，对于浓差电池的生成特别敏感。

- 材料在使用过程中，承受应力腐蚀裂纹或腐蚀疲劳的能力并不都能通过标准的实验室试验对其数值做出精确预测。事实上，在实际工况里如果材料对上述任意一种的失效过程具有敏感性的话，就会导致突发性或不可预测的失效，因为在应力和腐蚀的共同作用下，裂纹的发展是非常迅速的。

稳定性。材料的稳定性是受温度、温度的波动、在温度中的时间长短以及有些用途中还要受放射线的照射等因素的影响。温度的提高不仅会降低强度和引起蠕变，而且还会造成显微组织的变化，例如马氏体钢的回火和析出硬化合金的过度时效。显然，材料所经受的时间对于确定这些现象发生所达到的程度、依此再以此确定适当的稳定性要求都是非常重要的。以火箭发动机为例，只需运行一段短暂的时间，而蒸汽轮机则期待能工作许多年。对于很多用途来说，起码要避免发生任何或者一切会导致设备停机修理的失效。另一方面，特别期待的是一些因机械磨损而能定期更换的零件，并且设计出便于更换的易损件。

关于稳定性的其他问题就是其失效所导致的后果。譬如，茶叶罐的漏气只不过有些讨厌，但是装有可燃性或放射性液体的容器如发生泄漏，其后果将是致命的。应当指出，许多用于长期运行的设计都要进行推算或合理估算其寿命，因为根据最为适用的设计数据计算的寿命远远短于在实际工作中所预期的寿命。为了实际运行而需要在设计中采取这样的保守性原则，应该是不言而喻的。

具有独特意义的性能。大部分材料的选择问题就是要在大量的材料性能及其制造特性中进行权衡，其每一种性能和特性都会对最后的选择产生相当的影响。然而往往只有一、二种性能比其他的性能更具其独特意义。下面列举一些应用例子，说明具有独特意义的性能在材料选择中所起的作用：

- 高密度：陀螺仪转子和自动上弦手表中的上弦平衡块。
- 高刚性-重量比：飞机的框架结构。
- 低熔点：洒水灭火系统和消防门中的熔丝。
- 凝固过程中的膨胀性：铸字金属。
- 特殊热膨胀特性：金属-玻璃间的密封。
- 电导率(包括超导性)：电力分配系统。
- 耐磨性：许多用途，从犁铧、矿石粉碎机的齿板到齿轮和凸轮表面。
- 生物相容性：假肢装置和牙齿的镶补及其合金。

以上仅仅是一部分的应用举例，每一种应用都以其一、二种特别重要的性能要求，从而使材料的可选择数量受到严格的限制。更为详细的内容将在本手册第3篇第14章中介绍。

特殊的性能组合要求将进一步限制材料的选择数量。氧化铍(BeO)具有像铝一样的导热性但是该合金又是电的绝缘体，因此这是人们所知道的仅有的一种高导热同时又低导电的材料。对于满足在低温下具有高韧性的用途要求的材料选择，只能限于面心立方晶格，即某种高镍钢。在高温条件下工作的涡轮发动机叶片，必须能够在其运行的温度里既能抗变形又可耐腐蚀，而且不能再发生热疲劳的失效。

成本。在几乎所有的情况下，作为特殊用途材料的最终选择都取决于一种折中。某些特殊要求的应用会将材料限制在相当小的选择范围里。即便如此，还是需要在多种竞争性很强的因素之间进行折中。这种折中及其最后的选择还包括经济方面的考虑。一台设备的初始成本包含原材料、加工、装配和安装成本。虽然材料成本对零件的制造成本产生主要影响——按照参考文献[21]的估算为60%的产品制造成本——但是一般在构成设备的整个寿命周期的成本中，还只是相对较小的部分。在设备投入运行之后还会有一些附加的成本，如投资的回报率、跌价、税负、产品债务成本、维修用备件、当设备维修或更换备件时产生的停机费用以及生产损耗。

在工业上，总是通过更有效地使用材料来节省费用。为了通过更好地使用材料来降低成本，至少会从以下三方面进行分析：①对所选择的材料和生产形式进行反复考虑；②对零件的形状及其加工方法进行反复考虑；③为充分利用材料的性能进行再设计。虽然这些分析都基本上用于生产线的零件而不是特别定制的零件，但是其原则可以适用于所有的产品。

在很多的情况下，节省的定义被简单地理解为把一种材料改为另一种材料的权宜之计，而不用对工艺流程或生产形式作任何实质性的改变。在另一些用途里，可以考虑采用两种或更多种的材料作为替代使用，在一定的时间里具体采用哪一种则取决于当前的市场价格。

人们常常认识到重大的节约能够通过改变所用材料的加工流程或生产形式来实现，一个突出的例子就是汽车发动机曲轴。很多年以前，曲轴是用锻件进行切削加工的，因为只有锻件才能符合其相当严格的强度和韧性的技术指标。然而，高韧性并非曲轴所必须的要求，因为一根弯曲了的曲轴就像破碎的曲轴一样，都是不能用的，而且曲轴所承受的冲击载荷也并不严重。正是基于对以上事实的认识，才有可能实现改用铸造曲轴。如今，数以百万计的经济型曲轴都能

成功地运行，所有的曲轴都不会有任何塑性弯曲，但是却有着足够的刚性和耐磨性。经铸造和切削的曲轴的成本明显小于经锻造和切削的曲轴的成本。

参考文献

[1] J.H. Westbrook, Sources of Materials Property Data and Information, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 491–506.

[2] J.A. Schey, Manufacturing Processes and Their Selection, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 687–704.

[3] M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, 1992.

[4] L. Edwards and M. Endean, Ed., *Manufacturing with Materials*, Butterworths, 1990.

[5] Data Card Index, *Manufacturing with Materials*, The Open University, Milton Keynes, 1990.

[6] D.L. Bourell, Decision Matrices in Materials Selection, *Materials Selection and Design*, Vol 20, *ASM Handbook*, ASM International, 1997, p 291–296.

[7] S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1991, p 262.

[8] G.E. Dieter, Introduction to Workability, *Forming and Forging*, Vol 14, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 363–372.

[9] V. Vujovic and A.H. Shabaik, A New Workability Criterion for Ductile Metals, *J. Eng. Mater. Techol. (Trans. ASME)*, Vol 108, 1986, p 245–249.

[10] H.A. Kuhn, Workability Theory and Application in Bulk Forming Processes, *Forming and Forging*, Vol 14, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 388.

[11] G.E. Dieter, Ed., *Workability Testing Techniques*, ASM International, 1984.

[12] G.E. Dieter, Workability Tests, *Forming and Forging*, Vol 14, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 378.

[13] B. Taylor, Formability Testing of Sheet, *Forming and Forging*, Vol 14, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 877.

[14] F.W. Boulger, Machinability of Steels, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 591.

[15] C. Zimmerman, S.P. Boppana, and K. Katbi, Machinability Test Methods, *Machining*, Vol 16, *ASM Handbook*, ASM International, 1989, p 639.

[16] M.P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Prentice-Hall, 1996, p 560.

[17] S. Kalpakjian, *Manufacturing Process for Engineering Materials*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1991, p 494–496.

[18] H. Yaguchi, Machinability Testing of Carbon and Alloy Steels, *Machining*, Vol 16, *ASM Handbook*, ASM International, 1989, p 677.

[19] K.G. Budinski, *Engineering Materials: Properties and Selection*, 4th ed., Prentice-Hall, 1992, p 559.

[20] S. Liu and J.E. Indacochea, Weldability of Steels, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 603.

[21] R.S. Nyquist, Paradigm Shifts in Manufacturing Management, *J. Appl. Manuf. Sys.*, Vol 3 (No. 2), Winter 1990.

第2篇　铁、钢和高性能合金

第1章　铁和钢的组织与性能之间的关系

Bruce L. Bramffit

***Bethlehem* 钢铁公司，*Homer* 研究室**

本章引自《ASM 手册》第 20 卷材料的选用和设计，1997，357-382 页。其他内容可查阅本手册后面铸铁和钢的有关章节。

铁和钢的性能是与它们的化学成分、工艺路线及由此形成的材料显微组织相关的，这种相关性从 20 世纪初就为大家所熟知。具有某种成分的钢和铁的大部分性能取决于其显微组织。这些性能叫做组织敏感性性能，例如屈服强度和硬度。而非组织敏感性性能，如导电性在本章不予讨论。生产工艺是一种形成和控制其显微组织的方法，例如热轧、淬火等。在本章中，这些因素所起的作用，特别是对显微组织的作用，将从理论和实践两方面进行阐述。

材料选用的基础

为了给一种特定的零件选择材料，设计者必须全面掌握所要求性能的知识，还必须考虑到环境（腐蚀、高温等）和机械构件如何生产（焊接、螺钉连接等）。一旦性能要求确定了，便可以开始材料的选择过程。应当考虑的性能有：

力 学 性 能	其他性能/特征
强度	成形性
抗拉强度（强度极限）	可拉（拉深）性
屈服强度	拉伸性
抗压强度	可弯性
硬度	耐磨性
韧性	耐磨粒磨损
缺口韧性	耐划伤
断裂韧性	耐滑动磨损
塑性	耐粘着磨损
总伸长率	切削性
断面收缩率	焊接性
抗疲劳性	

表 2.1-1 所示是所选定的钢在不同的热处理和冷压力加工条件下的力学性能。

表 2.1-1　选用钢种的力学性能

钢号	状　　态	抗拉强度		屈服强度		伸长率 50mm（%）	断面收缩率（%）	硬度 HB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
碳钢棒料[①]								
1006	热轧	295	43	165	24	30	55	86
	冷拉	330	48	285	41	20	45	95
1008	热轧	305	44	170	24.5	30	55	86
	冷拉	340	49	285	41.5	20	45	95
1010	热轧	325	47	180	26	28	50	95
	冷拉	365	53	305	44	20	40	105

（续）

钢号	状态	抗拉强度 MPa	抗拉强度 ksi	屈服强度 MPa	屈服强度 ksi	伸长率 50mm(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
碳钢棒料[①]								
1012	热轧	330	48	185	26.5	28	50	95
	冷拉	370	54	310	45	19	40	105
1015	热轧	345	50	190	27.5	28	50	101
	冷拉	385	56	325	47	18	40	111
1016	热轧	380	55	205	30	25	50	110
	冷拉	420	61	350	51	18	40	121
1017	热轧	365	53	200	29	26	50	105
	冷拉	405	59	340	49	18	40	116
1018	热轧	400	58	220	32	25	50	116
	冷拉	440	64	370	54	15	40	126
1019	热轧	405	59	225	32.5	25	50	116
	冷拉	455	66	380	55	15	40	131
1020	热轧	380	55	205	30	25	50	111
	冷拉	420	61	350	51	15	40	121
1021	热轧	420	61	230	33	24	48	116
	冷拉	470	68	395	57	15	40	131
1022	热轧	425	62	235	34	23	47	121
	冷拉	475	69	400	58	15	40	137
1023	热轧	385	56	215	31	25	50	111
	冷拉	425	62	360	52.5	15	40	121
1524	热轧	510	74	285	41	20	42	149
	冷拉	565	82	475	69	12	35	163
1025	热轧	400	58	220	32	25	50	116
	冷拉	440	64	370	54	15	40	126
1026	热轧	440	64	240	35	24	49	126
	冷拉	490	71	415	60	15	40	143
1527	热轧	515	75	285	41	18	40	149
	冷拉	570	83	485	70	12	35	163
1030	热轧	470	68	260	37.5	20	42	137
	冷拉	525	76	440	64	12	35	149
1035	热轧	495	72	270	39.5	18	40	143
	冷拉	550	80	460	67	12	35	163
1536	热轧	570	83	315	45.5	16	40	163
	冷拉	635	92	535	77.5	12	35	187

（续）

钢号	状　态	抗拉强度		屈服强度		伸长率50mm(%)	断面收缩率(%)	硬度HB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
碳钢棒料[①]								
1037	热轧	510	74	280	40.5	18	40	143
	冷拉	565	82	475	69	12	35	167
1038	热轧	515	75	285	41	18	40	149
	冷拉	570	83	485	70	12	35	163
1039	热轧	545	79	300	43.5	16	40	156
	冷拉	605	88	510	74	12	35	179
1040	热轧	525	76	290	42	18	40	149
	冷拉	585	85	490	71	12	35	170
1541	热轧	635	92	350	51	15	40	187
	冷拉	705	102.5	600	87	10	30	207
	退火，冷拉	650	94	550	80	10	45	184
1042	热轧	550	80	305	44	16	40	163
	冷拉	615	89	515	75	12	35	179
	正火，冷拉	585	85	505	73	12	45	179
1043	热轧	565	82	310	45	16	40	163
	冷拉	625	91	530	77	12	35	179
	正火，冷拉	600	87	515	75	12	45	179
1044	热轧	550	80	305	44	16	40	163
1045	热轧	565	82	310	45	16	40	163
	冷拉	625	91	530	77	12	35	179
	退火，冷拉	585	85	505	73	12	45	170
1046	热轧	585	85	325	47	15	40	170
	冷拉	650	94	545	79	12	35	187
	退火，冷拉	620	90	515	75	12	45	179
1547	热轧	650	94	360	52	15	30	192
	冷拉	710	103	605	88	10	28	207
	退火，冷拉	655	95	585	85	10	35	187
1548	热轧	660	96	365	53	14	33	197
	冷拉	735	106.5	615	89.5	10	28	217
	退火，冷拉	645	93.5	540	78.5	10	35	192
1049	热轧	600	87	330	48	15	35	179
	冷拉	670	97	560	81.5	10	30	197
	退火，冷拉	635	92	530	77	10	40	187

（续）

钢号	状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率 50mm(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
碳钢棒料[①]								
1050	热轧	620	90	340	49.5	15	35	179
	冷拉	690	100	580	84	10	30	197
	退火，冷拉	655	95	550	80	10	40	189
1552	热轧	745	108	410	59.5	12	30	217
	退火，冷拉	675	98	570	83	10	40	193
1055	热轧	650	94	355	51.5	12	30	192
	退火，冷拉	660	96	560	81	10	40	197
1060	热轧	675	98	370	54	12	30	201
	球化退火，冷拉	620	90	485	70	10	45	183
1064	热轧	670	97	370	53.5	12	30	201
	球化退火，冷拉	615	89	475	69	10	45	183
1065	热轧	690	100	380	55	12	30	207
	球化退火，冷拉	635	92	490	71	10	45	187
1070	热轧	705	102	385	56	12	30	212
	球化退火，冷拉	640	93	495	72	10	45	192
1074	热轧	725	105	400	58	12	30	217
	球化退火，冷拉	650	94	505	73	10	40	192
1078	热轧	690	100	380	55	12	30	207
	球化退火，冷拉	650	94	500	72.5	10	40	192
1080	热轧	770	112	425	61.5	10	25	229
	球化退火，冷拉	675	98	515	75	10	40	192
1084	热轧	820	119	450	65.5	10	25	241
	球化退火，冷拉	690	100	530	77	10	40	192
1085	热轧	835	121	460	66.5	10	25	248
	球化退火，冷拉	695	100.5	540	78	10	40	192
1086	热轧	770	112	425	61.5	10	25	229
	球化退火，冷拉	670	97	510	74	10	40	192
1090	热轧	840	122	460	67	10	25	248
	球化退火，冷拉	695	101	540	78	10	40	197
1095	热轧	825	120	455	66	10	25	248
	球化退火，冷拉	680	99	525	76	10	40	197
1211	热轧	380	55	230	33	25	45	121
	冷拉	515	75	400	58	10	35	163

（续）

钢号	状　　态	抗拉强度 MPa	抗拉强度 ksi	屈服强度 MPa	屈服强度 ksi	伸长率 50mm（%）	断面收缩率（%）	硬度 HB
碳钢棒料[①]								
1212	热轧	385	56	230	33.5	25	45	121
	冷拉	540	78	415	60	10	35	167
1213	热轧	385	56	230	33.5	25	45	121
	冷拉	540	78	415	60	10	35	167
12L14	热轧	395	57	235	34	22	45	121
	冷拉	540	78	415	60	10	35	163
1108	热轧	345	50	190	27.5	30	50	101
	冷拉	385	56	325	47	20	40	121
1109	热轧	345	50	190	27.5	30	50	101
	冷拉	385	56	325	47	20	40	121
1117	热轧	425	62	235	34	23	47	121
	冷拉	475	69	400	58	15	40	137
1118	热轧	450	65	250	36	23	47	131
	冷拉	495	72	420	61	15	40	143
1119	热轧	425	62	235	34	23	47	121
	冷拉	475	69	400	58	15	40	137
1132	热轧	570	83	315	45.5	16	40	167
	冷拉	635	92	530	77	12	35	183
1137	热轧	605	88	330	48	15	35	179
	冷拉	675	98	565	82	10	30	197
1140	热轧	545	79	300	43.5	16	40	156
	冷拉	605	88	510	74	12	35	170
1141	热轧	650	94	355	51.5	15	35	187
	冷拉	725	105.1	605	88	10	30	212
1144	热轧	670	97	365	53	15	35	197
	C冷拉	745	108	620	90	10	30	217
1145	热轧	585	85	325	47	15	40	170
	冷拉	650	94	550	80	12	35	187
1146	热轧	585	85	325	47	15	40	170
	冷拉	650	94	550	80	12	35	187
1151	热轧	635	92	350	50.5	15	35	187
	冷拉	705	102	595	86	10	30	207
1340	正火870℃（1600℉）	834	121	558	81	22.0	63	248
	退火800℃（1475℉）	703	102	434	63	25.5	57	207

（续）

钢号	状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率50mm(%)	断面收缩率(%)	硬度HB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
碳钢棒料[①]								
3140	正火870℃(1600℉)	889	129	600	87	19.7	57	262
	退火815℃(1500℉)	690	100	420	61	24.5	51	197
4130	正火870℃(1600℉)	670	97	435	63	25.5	59.5	197
	退火865℃(1585℉)	560	81	460	67	21.5	59.6	217
	水淬从855℃(1575℉)，并回火540℃(1000℉)	1040	151	979	142	18.1	63.9	302
4140	正火870℃(1600℉)	1020	148	655	95	17.7	46.8	302
	退火815℃(1500℉)	655	95	915	60	25.7	56.9	197
	水淬从845℃(1550℉)，并回火540℃(1000℉)	1075	156	986	143	15.5	56.9	311
4150	正火870℃(1600℉)	1160	168	731	106	11.7	30.8	321
	退火830℃(1525℉)	731	106	380	55	20.2	40.2	197
	油淬从830℃(1525℉)，并回火540℃(1000℉)	1310	190	1215	176	13.5	47.2	375
4320	正火895℃(1640℉)	793	115	460	67	20.8	51	235
	退火850℃(1560℉)	580	84	425	62	29.0	58	163
4340	正火870℃(1600℉)	1282	186	862	125	12.2	36.3	363
	退火810℃(1490℉)	745	108	470	68	22.0	50.0	217
	油淬从800℃(1475℉)，并回火540℃(1000℉)	1207	175	1145	166	14.2	45.9	352
4419	正火955℃(1750℉)	515	75	350	51	32.5	69.4	143
	退火915℃(1675℉)	450	65	330	48	31.2	62.8	121
4620	正火900℃(1650℉)	570	83	365	53	29.0	66.7	174
	退火855℃(1575℉)	510	74	370	54	31.3	60.3	149
4820	正火正火860℃(1580℉)	758	110	485	70	24.0	59.2	229
	退火815℃(1500℉)	685	99	460	67	22.3	58.8	197
5140	正火870℃(1600℉)	793	115	470	68	22.7	59.2	229
	退火830℃(1525℉)	570	83	290	42	28.6	57.3	167
	油淬从845℃(1550℉)，并回火540℃(1000℉)	972	141	841	122	18.5	58.9	293
5150	正火870℃(1600℉)	869	126	530	77	20.7	58.7	255
	退火825℃(1520℉)	675	98	360	52	22.0	43.7	197
	油淬从830℃(1525℉)，并回火540℃(1000℉)	1055	159	1000	145	16.4	52.9	311
5160	正火855℃(1575℉)	1025	149	650	94	18.2	50.7	285
	退火815(1495℉)	724	105	275	40	17.2	30.6	197
	油淬从830℃(1525℉)，并回火540℃(1000℉)	1145	166	1005	146	14.5	45.7	341
6150	正火870℃(1600℉)	938	136	615	89	21.8	61.0	269
	退火815℃(1500℉)	670	97	415	60	23.0	48.4	197
	油淬从845℃(1550℉)，并回火540℃(1000℉)	1200	174	1160	168	14.5	48.2	352

（续）

钢号	状　态	抗拉强度		屈服强度		伸长率	断面收缩率(%)	硬度HB
		MPa	ksi	MPa	ksi	50mm(%)		
碳钢棒料[①]								
8620	正火915℃(1675℉)	635	92	360	52	26.3	59.7	183
	退火870℃(1600℉)	540	78	385	56	31.3	62.1	149
8630	正火870℃(1600℉)	650	94	425	62	23.5	53.5	187
	退火845℃(1550℉)	565	82	370	54	29.0	58.9	156
	水淬从845℃(1550℉)，并回火540℃(1000℉)	931	135	850	123	18.7	59.6	269
8650	正火870℃(1600℉)	1025	149	690	100	14	45.0	302
	退火795℃(1465℉)	715	104	385	56	22.5	46.0	212
	油淬从800℃(1475℉)，并回火540℃(1000℉)	1185	172	1105	160	14.5	49.1	352
8740	正火870℃(1600℉)	931	135	605	88	16.0	47.9	269
	退火815℃(1500℉)	696	101	415	60	22.2	46.4	201
	油淬从830℃(1525℉)，并回火540℃(1000℉)	1225	178	1130	164	16.0	53.0	352
9255	正火900℃(1650℉)	931	135	580	84	19.7	43.4	269
	退火845℃(1550℉)	779	113	485	70	21.7	41.1	229
	油淬从885℃(1625℉)，并回火540℃(1000℉)	1130	164	924	134	16.7	38.3	321
9310	正火890℃(1630℉)	910	132	570	83	18.8	58.1	269HRB
	退火845℃(1550℉)	820	119	450	65	17.3	42.1	241HRB
铁素体不锈钢[②]								
405	退火棒	483	70	276	40	30	60	150
	冷拉棒	586	85	483	70	20	60	185
409	退火棒	450	65	240	35	25	—	75HRB
430	退火棒	517	75	310	45	30	65	155
	退火和冷拉	586	85	483	70	20	65	185
442	退火棒	515	75	310	45	30	50	160
	退火815℃(1500℉)和冷压加工	545	79	427	62	35.5	79	92HRC
446	退火棒	550	80	345	50	25	45	86HRB
	退火815℃(1500℉)、冷拉	607	88	462	67	26	64	96HRB
马氏体不锈钢[②]								
403	退火棒	515	75	275	40	35	70	82HRB
	回火棒	765	111	585	85	23	67	97HRB
410	油淬从980℃(1800℉)，并回火540℃(1000℉)；16mm(0.625in)棒	1085	158	1005	146	13	70	—
	油淬从980℃(1800℉)，并回火40℃(104℉)；16mm(0.625in)棒	1525	221	1225	178	15	64	45HRB

（续）

钢号	状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率	断面收缩	硬度
		MPa	ksi	MPa	ksi	50mm(%)	率(%)	HB
马氏体不锈钢[②]								
414	退火棒	795	115	620	90	20	60	235
	冷拉棒	895	130	795	115	15	58	270
	油淬从980℃(1800℉)，并回火650℃(1200℉)	1005	146	800	116	19	58	—
420	退火棒	655	95	345	50	25	55	195
	退火和冷拉	760	110	690	100	14	40	228
431	退火棒	860	125	655	95	20	55	260
	退火和冷拉	895	130	760	110	15	35	270
	油淬从980℃(1800℉)，并回火650℃(1200℉)	831	121	738	107	20	64	—
	油淬从980℃(1800℉)，并回火40℃(104℉)	1435	208	1140	166	17	59	45HRC
440C	退火棒	760	110	450	65	14	25	97HRB
	退火和冷拉棒	860	125	690	100	7	20	260
	淬火并回火315℃(600℉)	1970	285	1900	275	2	10	580
奥氏体不锈钢[②]								
201	退火	760	110	380	55	52	—	87HRB
	50%硬度	1035	150	760	110	12	—	32HRC
	全硬度	1275	185	965	140	8	—	41HRC
	超硬度	1550	225	1480	215	1	—	43HRC
202	退火棒	515	75	275	40	40	—	—
	退火板	655	95	310	45	40	—	—
	50%硬度板	1030	150	760	110	10	—	—
301	退火	725	105	275	40	60	70	—
	50%硬度	1035	150	655	95	54	61	—
	全硬度	1415	205	1330	193	6	—	—
302	退火带	620	90	275	40	55	—	80HRB
	25%硬度带	860	125	515	75	12	—	25HRC
	退火棒	585	85	240	35	60	70	80HRB
303	退火棒	620	90	240	35	50	55	160
	冷拉	690	100	415	60	40	53	228
304	退火棒	585	85	235	34	60	70	149
	退火和冷拉	690	100	415	60	45	—	212
	冷拉高拉伸	860	125	655	95	25	—	275
305	退火板	585	85	260	38	50	—	80HRB
308	退火棒	585	85	205	30	55	65	150
309	退火棒	655	95	275	40	45	65	83HRB

（续）

钢号	状　态	抗拉强度 MPa	抗拉强度 ksi	屈服强度 MPa	屈服强度 ksi	伸长率 50mm(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
奥氏体不锈钢②								
310	退火板	620	90	310	45	45	—	85HRB
	退火棒	655	95	275	40	45	65	160
314	退火棒	689	100	345	50	45	60	180
316	退火板	580	84	290	42	50	—	79HRB
	退火棒	550	80	240	35	60	70	149
	退火和冷拉棒	620	90	415	60	45	65	190
317	退火板	620	90	275	40	45	—	85HRB
	退火棒	585	85	275	40	50	—	160
321	退火板	620	90	240	35	45	—	80HRB
	退火棒	585	85	240	35	55	65	150
	退火和冷拉棒	655	95	415	60	40	60	185
330	退火板	550	80	260	38	40	—	—
	退火棒	585	85	290	42	45	—	80HRB
347	退火板	655	95	275	40	45	—	85HRB
	退火棒	620	90	240	35	50	65	160
	退火和冷拉棒	690	100	450	65	40	60	212
384	退火丝[1040℃(1900℉)]	515	75	240	35	55	72	70HRB
马氏体时效钢②								
18Ni(250)	退火	965	140	655	95	17	75	30HRC
	时效棒 32mm(1.25in)	1844	269	1784	259	11	56.5	51.8HRC
	时效板 6mm(0.25in)	1874	272	1832	266	8	40.8	50.6HRC
18Ni(300)	退火	1034	150	758	110	18	72	32HRC
	时效棒 32mm(1.25in)	2041	269	2020	293	11.6	55.8	54.7HRC
	时效板 6mm(0.25in)	2169	315	2135	310	7.7	35	55.1HRC
18Ni(350)	退火	1140	165	827	120	18	70	35HRC
	时效棒 32mm(1.25in)	2391	347	2348	341	7.6	33.8	58.4HRC
	时效板 6mm(0.25in)	2451	356	2395	347	3	15.4	57.7HRC

①所有的值为估计最小值，1100系列钢是以最大0.10%（质量分数）Si或粗晶熔炼为基础评定的，所列的力学性能为最小期望值，试件尺寸为19～31.8mm(0.75～1.25in)。　②大部分数据取自直径25mm(1in)的棒料。

引自参考文献[1]。

在选择生产过程中，作为一种用途所要求的性能可能完全不适用于另一种用途的性能。例如铁路桥梁上用的钢梁所要求的性能完全不同于铺设在桥面枕木上的钢轨所要求的性能。设计桥梁时，钢材必须有足够的强度以承受实际的作用载荷。事实上设计者所选择的钢的强度往往高于实际要求的。设计者还需知道，钢必须有断裂韧性以防止裂纹的生成和扩展，另外还要能被焊接，使其结构件连接在一起而不至于牺牲其强度和韧性。钢桥梁还必须有耐腐蚀性。这可以由油漆涂层提供。如果不能使用油漆，则可以加入少

量的合金元素，如加入铜和铬可以防止腐蚀或降低腐蚀率。因此，用于桥梁的钢材应当是高强度的低合金结构钢(HSLA)如 ASTM A572，50 级，也可能为耐候钢如 ASTM A588。一种典型的 HSLA 钢如图 2.1-1 所示，是铁素体-珠光体的显微组织，并含有微量合金元素钒和/或铌，以便增强其强度(微合金化，即 microalloying，是指加入少量氮化碳的形成元素——钛、钒和铌，即可通过细化晶粒和析出硬化来提高强度)。

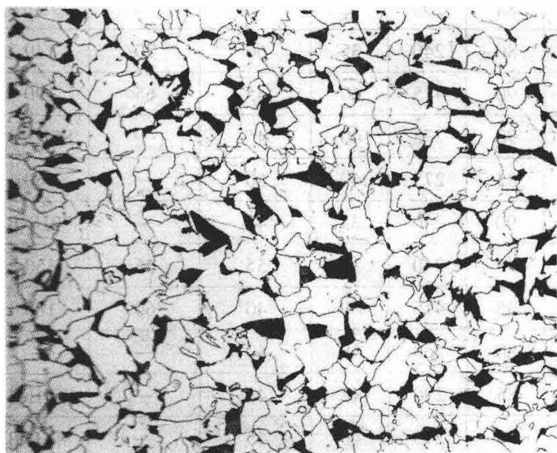


图 2.1-1 典型的 HSLA 结构钢的铁素体-珠光体显微组织(ASTMA572，级别 50)。2% 硝酸乙醇 +4% 苦味醇溶液腐蚀。200 ×

另一方面，作为钢轨必须具有高强度并同时具有高耐磨性。现代轨道钢是一种细层片状的全珠光体显微组织，如图 2.1-2 所示。珠光体的独特之处在于它是由 88% 的软而可延的铁素体和 12% 的硬而脆的渗



图 2.1-2 典型的全珠光体轨道钢显微组织，显示特征性的珠光体细层片间距。2% 硝酸乙醇 +4% 苦味醇溶液腐蚀。500 ×

碳体(Fe_3C)组成的层状复合组织。硬的渗碳体片具有非常优良的耐磨性，特别是当其镶嵌在软的铁素体上时。珠光体钢有很高的强度，完全适合承受现代机车和货运列车的轮轴重载。大部分的载荷是以压缩力作用的。珠光体钢的韧性相对较差，不能保证在冲击载荷的作用下不遭受损坏。轨道钢适应不了构建桥梁的要求，而 HSLA 结构钢则无法满足设计桥梁轨道系统的建筑工程师们提出的要求。

还可以举出选用灰铸铁的类似情况。一台大型车床的铸件床身所要求的材料要具有适当的强度、刚性、承载的耐用度以及一定程度的缓冲能力，以使车床上由旋转工件造成的震动能得以迅速衰减(缓冲)。破碎机的灰铸铁颚板所要求的材料应具有很高的耐磨性。这种用途之所以要采用铸件是因为耐磨钢非常难以加工。作为机床床身选用灰铸铁还因为它相对便宜，容易铸造，而且由于其显微组织中有石墨片的存在而具有缓冲能力。这种石墨片遍布在铁素体和珠光体的基体组织中(见图 2.1-3)。作为灰铸铁中非金属



图 2.1-3 以铁素体-珠光体为基体的灰铸铁的显微组织。注意：石墨片分散在整个基体里。4% 苦味醇溶液腐蚀。320 ×。借用 Lehigh 大学，A. O. 本斯高特

组分的石墨为声音在材料中的传播提供了一条迂回的路径。也由于这么多的石墨片，声波很容易被反射，从而使声音能在较短的距离内得到缓冲。然而对于颚式破碎机却并没有缓冲的要求。在这种情况下，选用合金白口铸铁是因为它具有高硬度和高耐磨性。图 2.1-4所示的白口铸铁的显微组织里没有石墨，而是由以渗碳体为基体的马氏体所组成。这两种组分都非常硬，于是提供了所要求的耐磨性。上述例子说明，灰铸铁不能适应破碎机颚板的要求，而白口铸铁也无法满足车床床身的要求。

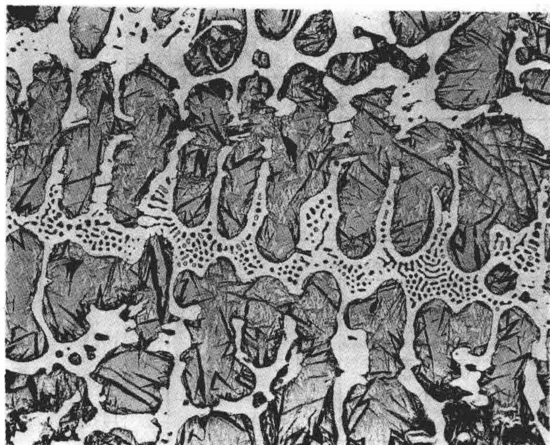


图2.1-4　一种白口铸铁的显微组织。白色组分是渗碳体，暗黑组分是带有一些残留奥氏体的马氏体。4%苦味醇溶液腐蚀。250×。借用 Lehigh 大学，A. O. 本斯高特

显微组织的作用

钢和铸铁的显微组织组分名称有铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体、渗碳体和奥氏体。在绝大部分其他的金属系统里，其组分并没有得到命名，而是按其组分在相图里的位置简单地用希腊字母（α、β、γ等）表示。另一方面，铁合金的组分已经被广泛地研究了100多年。早期的许多研究人员都是岩石学家、采矿工程师和地质学家。由于长期以来矿石都是以其发现者或最初发现地命名的，因此钢和铸铁自然也就有了类似的命名。

从上面四个例子可以看出相差迥异的显微组织：结构钢为铁素体加上珠光体，轨道钢为全珠光体，（车床）床身为在铁素体、珠光体的基体中含有石墨片，而破碎机的颚板则由马氏体和渗碳体构成。无论哪一种情况，它们都分别为各自的用途提供所要求的性能，其显微组织都发挥着至关重要的作用。从这些例子还能看到，材料的性能可以通过显微组织的转变或替换来进行调整。因此有关显微组织的知识对于零件的设计和合金材料的开发都是最为重要的。在后文中，将特别针对由变形（如热轧或冷轧）和热处理所引起的相应显微组织的转变，及因此形成的性能分别对显微组织的每一种组分进行阐述。关于显微组织的进一步详述还可以参阅参考文献[2]～[6]。

铁素体

种类繁多的钢和铸铁其实都在于其铁素体性能的充分开发，然而只有一部分生产用钢是全铁素体。图2.1-5所示为关于全铁素体的显微组织的一个例子——超低碳钢。

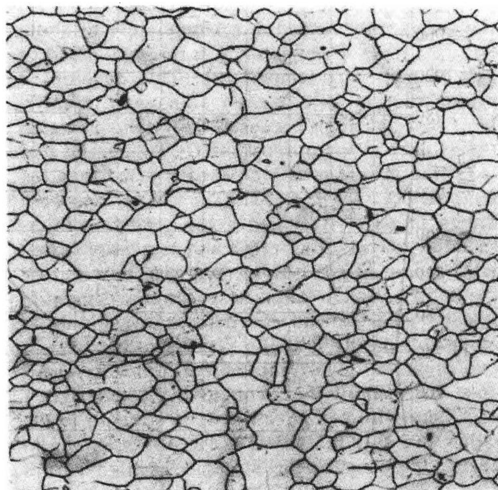
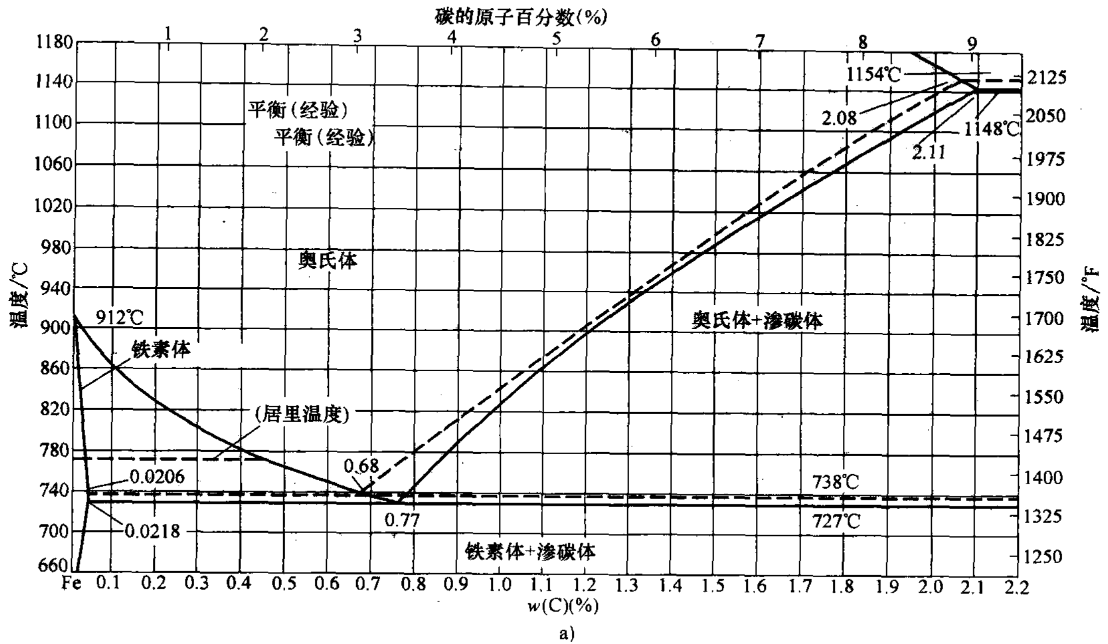


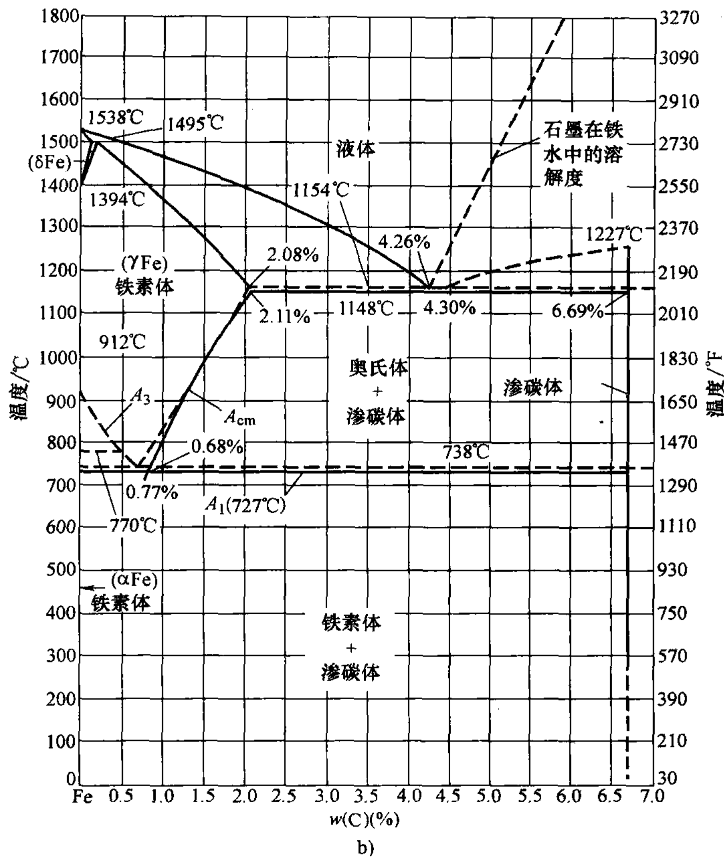
图2.1-5　全铁素体显微组织，超低碳钢。马歇尔斯腐蚀＋HF，300×。借用 Lehigh 大学，A. O. 本斯高特

铁素体基本上是一种铁的固溶体，它含有碳或一种或多种合金化元素，如硅、铬、锰和镍。有两种类型的固溶体：填隙型和置换型。在间隙固溶体中，小原子直径的元素，如碳和氮占据了体心立方（bcc）铁晶格中的特定空隙位置。在较大的铁原子之间，这些位置基本上都是开放的空位。在替代固溶体中直径大小相似的原子替代或换位于铁原子。这两种类型的固溶体赋予铁素体以不同的特征。例如，间隙元素，如碳和氮很容易通过开放的bcc晶格进行扩散；而替代元素，像锰和镍扩散起来则非常困难。因此，铁和碳的间隙固溶体在热处理过程中能很快地相适应，而替代固溶体在热处理（如均质化的过程）中，其进展非常迟缓。

如图2.1-6a所示，即使在共析温度727℃（1330℉）下，也只有非常少的碳（0.022%）能溶于铁素体（αFe）里（铁-碳相图显示其相区覆盖了一个很大的碳和温度的范围。相图也代表了平衡的条件。图2.1-6b所示是一个同时有共析和共晶区的经扩张的铁-碳相图）。在室温下，溶解度的数量级是非常低的（w(C)低于0.005%）。然而，即使碳在纯铁里的添加量如此之小，也会令铁的室温屈服强度增加5倍以上，如图2.1-7所示。如果w(C)超过溶解极限0.022%，碳则会形成另一种相（叫做渗碳体）（见图2.1-8）。渗碳体也是珠光体的一种组分，如图2.1-9所示。下面将讨论渗碳体和珠光体对钢力学性能的作用。



a)



b)

图 2.1-6

a）铁-碳相图，图示为奥氏体(γ-Fe)和(α-Fe)相区和共析成分及温度。虚线代表铁-石墨平衡条件，实线代表铁-渗碳体平衡条件。对于钢而言，只有实线是重要的。引自参考文献[2]

b）扩大的铁-碳相图，图示为共析(见图2.1-6a)和共晶两个相区。虚线代表铁-石墨平衡条件，实线代表铁-渗碳体平衡条件。对于白口铸铁，共晶实线是重要的；而对于灰铸铁，虚线是重要的。引自参考文献[2]

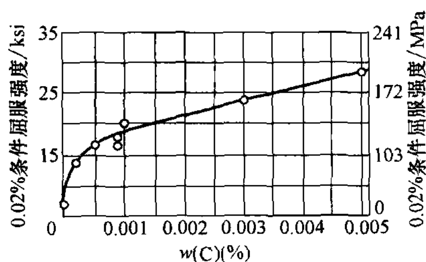


图 2.1-7　在室温下，屈服强度随碳含量的减小而提高。引自参考文献[7]

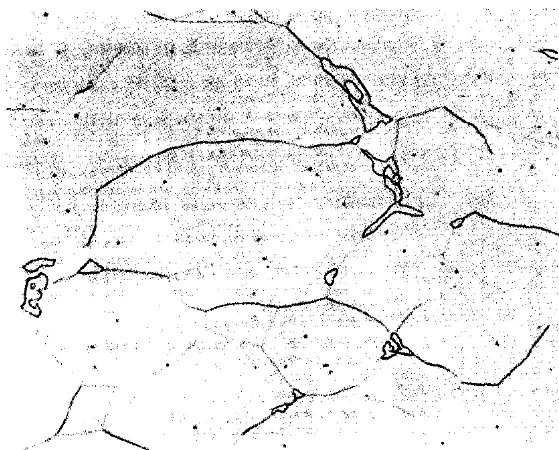


图 2.1-8　带有晶界渗碳体的退火低碳钢板的显微照片。2%硝酸乙醇+4%苦味醇溶液腐蚀。1000×

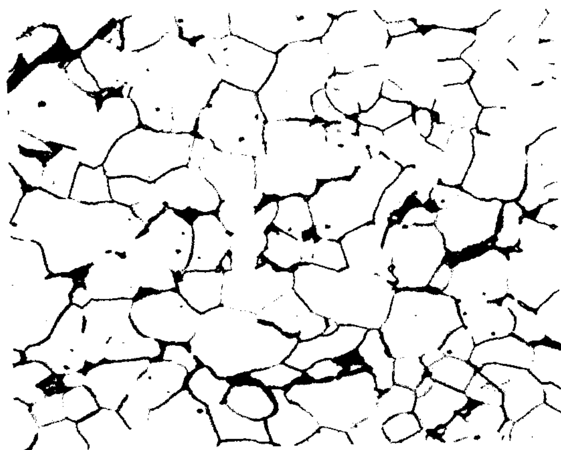


图 2.1-9　低碳钢板中珠光体(暗黑色组分)**的显微照片。**2%硝酸乙醇+4%苦味醇溶液腐蚀。1000×

图 2.1-10 显示了固溶体元素对铁素体的屈服强度的影响。从中可以看出，碳对提高铁素体的强度有很强的效果；氮也是一种有相似效果的间隙元素；磷也作为铁素体的增强剂。事实上，生产中用钢常以添加磷(w(P)高达 0.12%)来提高强度。这种钢就是回

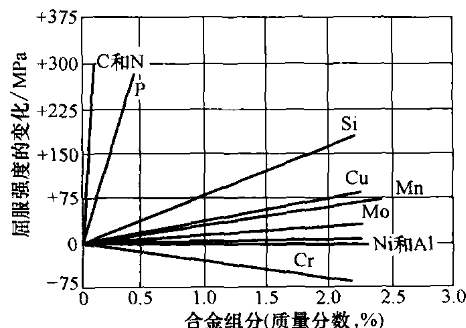


图 2.1-10　低碳铁素体钢的固溶体元素对屈服强度的影响。引自参考文献[5]

磷钢(类别为 1211～1215 系列)，这些钢的力学性能数据如表 2.1-1 所示。

在图 2.1-10 中，硅、铜、锰、钼、镍、铝和铬等替代固溶体元素所显示的铁素体增强效果远不如间隙元素。实际上，铬、镍和铝在固溶体中对铁素体强度的影响是非常有限的。

除了碳(以及其他固溶体元素)之外，铁素体钢的强度也是由遵循霍尔·皮奇关系(Hall-Petch relationship)的晶粒大小所决定的：

$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-1/2} \qquad (2.1\text{-}1)$$

式中，σ_y 为屈服强度(MPa)；σ_o 为常数；k_y 也是常数；d 为晶粒的直径(mm)。

晶粒直径是显微组织中铁素体晶粒大小的度量，例如图 2.1-5 中的是超低碳钢的晶粒。图 2.1-11 所示是低碳全铁素体钢的 Hall-Petch(霍尔·皮奇)关系。这个关系对于了解钢的组织-性能之间的关系是特别重要的。通过形变热处理、热处理和/或微合金化来控制晶粒的大小，以此对于控制大部分钢的强度和韧性是极其重要的。下面将更详细地讨论晶粒大小的作用。

有一种简单的方法可以使铁素体稳定化，就是通过加入如硅、铬和钼的合金元素来扩大铁-碳相图中的铁素体区域。这些元素就叫做铁素体稳定化元素，因为它们通过图 2.1-12 中最左侧所示的 γ-回路来减少 γ 固溶体(奥氏体)的数量，从而使铁素体在室温下稳定化。这张铁-铬相图表明处于 w(Cr)超过 12% 的铁素体在温度直至其熔点(液线温度)时都是稳定的。一种重要的全铁素体钢的家族就是铁-铬铁素体不锈钢。这种钢有耐腐蚀性，它们分类为：405、409、429、430、434、436、439、442、444 以及 446 不锈钢，其中 w(Cr)的范围从 11%～30%。钼、硅、铌、铝和钛的加入能提供特定性能。铁素体不锈钢有很好的塑性(总伸长率可达 30% 和断面收缩率 60%)和成形性，但是与奥氏体不锈钢相比，缺乏高温下的

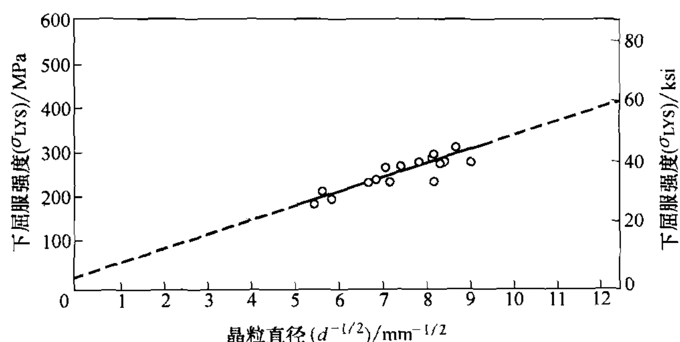


图 2.1-11 低碳铁素体钢的 Hall-Petch 关系。引自参考文献[8]

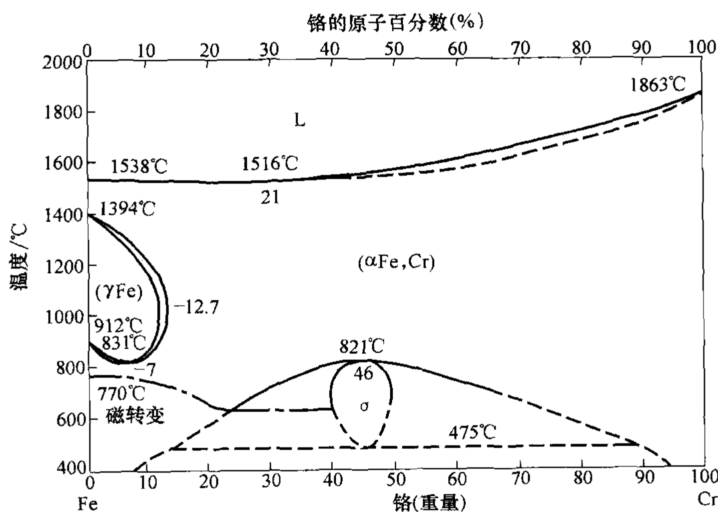


图 2.1-12 铁-铬相图。引自参考文献[9]

强度。其室温屈服强度范围从 170 ~ 440MPa(25 ~ 64ksi),以及室温抗拉强度范围从 380 ~ 550MPa(55 ~ 80ksi)。表 2.1-1 列出了一些铁素体不锈钢的力学性能。409 号不锈钢被广泛应用于汽车排气管系统里。高速切削不锈钢 430 号的切削性是在除了低碳钢和高速切削马氏体不锈钢(416 号)以外的所有不锈钢中最好的。

还有一组利用铁素体稳定化元素(γ-回路)的钢为铁-硅铁素体合金,其中 w(Si) 高达 6.5% Si(无碳)。这类钢颇具市场重要性,因为它们有极佳的磁导率和很低的铁心损耗。高效电动机和变压器就是用这种铁-硅电工钢制造的(有时也用铝代替硅)。

在过去的二十多年里,已涌现出一些非常低碳的全铁素体薄板钢的新品种,以满足一些有着特殊成形要求的应用(见图 2.1-5)。这些新品种有无间隙固溶原子钢(IF 或称极低碳氮钢),在其冶炼过程中,碳和氮的含量降到非常低的水平,而且所有遗留下来的填隙碳或氮都离不开少量的合金元素(如钛、或铌),它们首先结合成为碳化物和氮化物。

这些钢的强度非常低,但是能用于生产那些用其他钢很难或无法成形的零件。现在非常低碳的全铁素体钢(w(C) 为 0.001%)用于制造一些可以在油漆烤干期硬化的汽车零件。这些钢称之为烤硬钢,它们含有可控制的碳、氮含量,而碳、氮又在烤干期(175℃ 或 350℉,30min)与其他元素(如钛、铌)相结合。上述过程叫做时效,其硬度来自于高温下的碳氮化钛/铌析出。

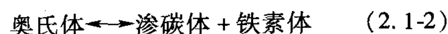
另一种形态的非常低碳的全铁素体钢是电动机铁心片钢。采用一种为大家所熟知的脱碳工艺可以将这些钢中的碳去除。经脱碳的铁素体钢(无碳)具有很好的磁导率和足够低的铁心损耗(但还未低到铁-硅合金的程度),故能用于电动机的铁心片,也就是电动机转子和定子里的叠层钢片。

如前所述,全铁素钢已开发出多种性能:

- 铁-硅钢:独特的电工性能;
- 铁-铬钢:很好的耐腐蚀性;
- 极低碳氮钢:独特的成形性;
- 烤硬钢:通过油漆烤干期强化;
- 夹层钢:很好的电工性能。

珠光体

如果钢里的含碳量增加到超过铁碳二元相图上的溶解度极限(0.02%)就会形成一种称之为珠光体的组分。珠光体是钢冷却通过共析温度(即图 2.1-6 中的 727℃ 温度)而生成的,并将发生如下的反应:



奥氏体←→渗碳体 + 铁素体 (2.1-2)

渗碳体和铁素体形成叫做夹层的平行薄层(见图 2.1-13)。这基本上是由非常硬的碳化物相(即渗碳体)和非常软并可延展的铁素体相间构成的复合显微组织。在图 2.1-2 和 2.1-13 中可以看到,全珠光体显微组织是由 w(C) 为 0.78% 的共析体成分组成的,珠光体都是按同样的方向排列其夹层而形成的晶团。全珠光体钢的性能是由铁素体-渗碳体层之间的间隔和晶团的大小所决定的,这个层片间距尺寸为 λ。由 Heller(参考文献[10])提出的关于屈服强度的简单关系式如下:

$$\sigma_y = -85.9 + 8.3(\lambda^{-1/2}) \qquad (2.1\text{-}3)$$

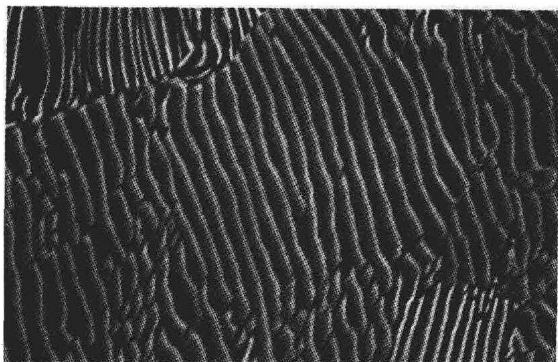


图2.1-13 珠光体的SEM显微照片，所示为铁素体和渗碳体片层。4%苦味醇溶液腐蚀。10000×

式中，σ_y 为0.2%的条件屈服强度(MPa)，λ 为层片间距(mm)。图2.1-14所示是全珠光体共析钢的强度相对层片间距的席勒曲线。

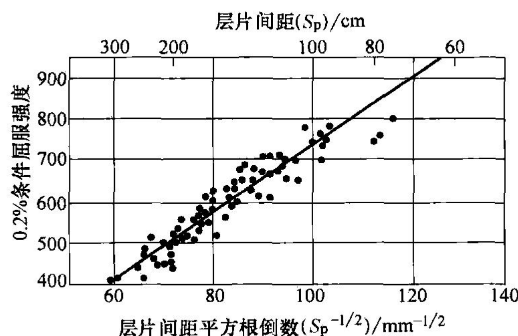


图2.1-14 共析钢珠光体层片间距与屈服强度之间的关系。引自参考文献[10]

Hyzak和本斯田(Bernstein)也提出强度与层片间距、珠光体晶团大小和原始奥氏体晶粒大小之间存在着如下关系：

$$YS = 52.3 + 2.18(\lambda^{-1/2}) - 0.4(d_c^{-1/2}) - 2.88(d^{-1/2}) \quad (2.1\text{-}4)$$

式中，YS 为屈服强度(MPa)，d_c 为珠光体晶团大小(mm)，而 d 为原始奥氏体晶粒大小(mm)。从式(2.1-3)和式(2.1-4)可以看出，钢的成分并不是影响全珠光体共析钢屈服强度的主要因素。在层片状组织中，还有铁素体的某种固溶体强化作用(见图2.1-10)。

渗碳体层的厚度也会影响珠光体的性能。薄的渗碳体层比厚的层更容易变形，但后者在变形过程中产生裂纹的可能性更大一些。

虽然全珠光体钢具有高强度、高硬度和高耐磨性，可是其塑性和韧性也较差。例如，一种典型的低碳全铁素体钢的总伸长率超过50%，而一种典型的全珠光体钢(如1080号)的总伸长率仅约为10%(表2.1-1)。一种低碳的全铁素体钢的室温夏比V形缺口冲击吸收功大约为200J(150lbf·ft)，而全珠光体钢的室温冲击吸收功不到10J(7lbf·ft)。全珠光体钢的韧脆转变温度(即材料从韧性断裂转变为脆性断裂的温度)有如下近似关系：

$$TT = 217.84 - 0.83(d_c^{-1/2}) - 2.98(d^{-1/2}) \quad (2.1\text{-}5)$$

式中，TT 为转变温度(℃)。

由式(2.1-5)可以看出，原始奥氏体晶粒和珠光体晶团的大小制约着珠光体钢的韧脆转变温度。可惜的是全珠光体钢的韧脆转变温度都是高于室温的。这说明在室温下，一般的断裂模式都是开裂型的，即与脆性断裂相关的。因此，全珠光体钢不应该用于那些韧性非常重要的用途上。还有，含碳量略高于或较高于共析成分(称为过共析钢)的珠光体钢的韧性甚至更差。

由式(2.1-4)和式(2.1-5)还能看出对于珠光体，其强度受制于层片间距、晶团大小和原始奥氏体晶粒大小，而韧性只是受制于晶团大小和原始奥氏体晶粒大小。遗憾的是这三个因素的测量相当困难。为了确定层片间距需使用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)，因为要分辨其间距。一般来说，10000×的放大倍数就可以了，如图2.1-13所示。已经有一种专门的统计方法用于间距的精密测量(参考文献[12])。晶团大小尤其是原始奥氏体晶粒的大小，则非常难以测量，要求金相工作者采用光学显微镜或SEM和特殊的腐蚀技术。

由于全珠光体钢的塑性/韧性较差，故其用途也就不太多，包括铁路轨道和轮子及高强度线材。迄今为止，其最大的工业用量是在钢轨上。全珠光体轨道钢为钢轨和轮子之间的接触提供了极好的耐磨性。钢轨的寿命是用百万吨的货运量(MGT)计量的。目前的钢轨寿命很容易超过250MGT。珠光体的耐磨性也因铁素体-渗碳体层状复合物的单一形态而得到提高，其中硬组分镶嵌在软且可延展的组分里。这说明硬的渗碳体片不像在其他钢的显微组织里所见到的圆形渗碳体颗粒那么容易被磨掉，后者就是以后要讨论的回火马氏体和贝氏体。轨道钢的耐磨性直接与硬度成正比。即如图2.1-15所示，硬度的增加使其重量损耗也随之减少。如图2.1-16所示，层片间距减小，其耐磨性也随之提高(即重量损耗减少)。由此可见，作为控制硬度和耐磨性的最重要显微组织参数就是珠光体的层片间距。幸好层片间距还是容易控制的，并仅取决于温度的转变。

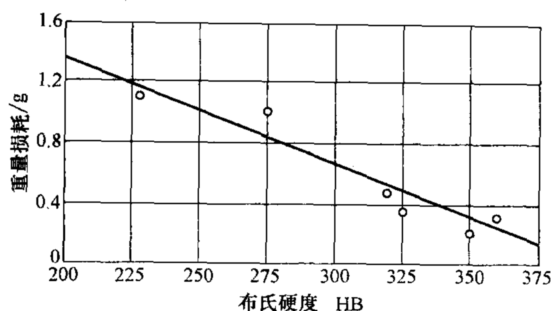


图 2.1-15 轨道钢的硬度与耐磨性(重量损耗)**之间的关系**。引自参考文献[13]

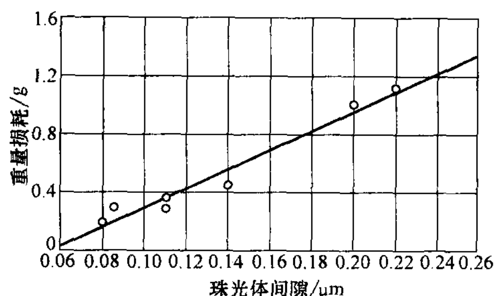


图 2.1-16 轨道钢的珠光体层片间距与耐磨性(重量损耗)**之间的关系**。引自参考文献[13]

图 2.1-17 所示是一种典型轨道钢的连续冷却转变(CCT)相图。CCT 相图就是时间对温度所画的曲线，由它表示的是一个钢零件中的不同组分——铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体——在连续冷却的过程中形成区域。通常图上所示的多条冷却曲线都与每一种组分开始和结束转变时的温度相关。这些曲线不应该与等温转变(IT 或 TTT)相图相混淆，后者是将非常薄的试件以不同的温度快速淬火所得到的曲线，即维持其温度(等温)直至试件开始转变、部分转变和完全转变，并且依次将它们从其温度淬火到室温。在大多数钢零件的连续冷却即空冷等的过程中，IT 相图并不代表其转变特性。

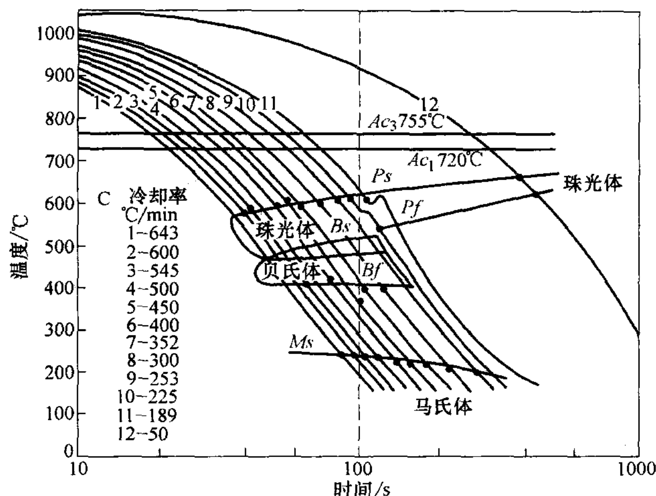


图 2.1-17 典型轨道钢的 CCT 相图(化学成分(质量分数)：0.77%C、0.22%Si、0.014%P、0.017%S、0.10%Cr)。引自参考文献[14]

如图 2.1-17 所示，珠光体的转变温度(由珠光体-起始曲线 *Ps* 表示)随冷却速率的增加而降低。珠光体的硬度也就随珠光体的转变温度的降低而增加。因此为使轨道钢获得最高的硬度和耐磨性，必须让钢轨从奥氏体以尽可能快的速率冷却，以便得到最低的转变温度。这种做法就是所谓的头部硬化，即简单地利用压缩风鼓吹或压力水喷洒的一种加速冷却工艺，用于达到所要求的冷却速率(参考文献[15])。因为只有轨道的上面头部与机车或车厢的车轮相接触，所以也只有头部要求高硬度和高耐磨性。

全珠光体钢的另一个用途就是高强度线材(如钢琴的琴弦)。此外，在拉制钢丝的时候，会形成一种层状的铁素体和渗碳体的复合形态。全珠光体圆钢要经过一种称为铅淬火工艺的热处理。在这个处理过程中，圆钢要在大约 540℃(1000℉)的温度里通过铅浴或盐浴发生转变。由此产生一种非常细的珠光体层片间距，因为其转变正处于 CCT 相图中的端部，即在尽可能低的珠光体转变温度下发生转变(见图 2.1-17)。然后再把圆钢冷拉成丝。由于它是一种非常细的珠光体层片间距，故铁素体和渗碳体的层片在其变形过程中都沿钢丝的长度取向。而且在拉制过程中，当钢丝延伸时细渗碳体层片趋向于弯曲和变形。最后生成的钢丝可以说是强度最高的工业用钢丝产品之一，例如作为工业成品的 0.1mm(0.004in)直径的钢丝，能承受的抗拉强度为 3.0 ~ 3.3GPa(439 ~ 485ksi)，而且特殊情况下强度甚至可高达 4.8GPa(696ksi)。这种钢丝被用于乐器里，因为用于钢琴和小提琴的琴弦需要在高拉应力下产生极佳的声音质量，此外还可应用于悬索桥上的钢丝缆绳。

铁素体-珠光体

目前生产的最为普通的结构钢都具有铁素体-珠光体混合的显微组织。它们的应用包括桥梁和高层建筑的承重梁、船用钢板以及铁道用的加强型钢。这些钢材比较便宜，而且均为大批量生产。它们还具有能在很大的性能范围里进行生产的优点。典型的铁素体-珠光体钢的显微组织如图 2.1-18 所示。

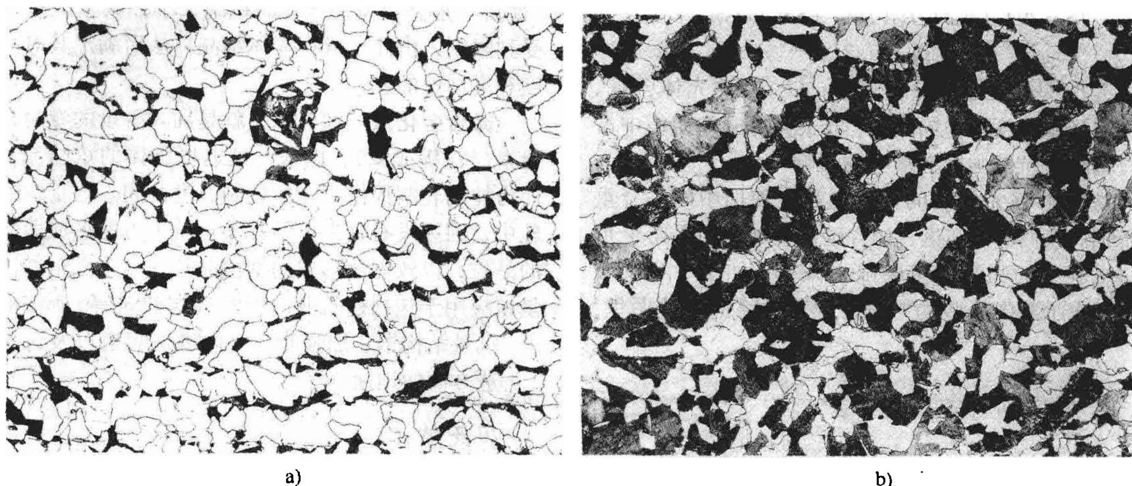


图 2.1-18　具有不同含碳量的典型铁素体-珠光体结构钢的显微组织

a）0.10%C　b）0.25%C。2%硝酸乙醇 +4%苦味醇溶液腐蚀。200×

大多数的铁素体-珠光体钢都由含碳量和晶粒大小决定其显微组织和最后的性能。例如，图 2.1-19 所示是碳对抗拉强度和冲击性能的影响。抗拉强度的极限值随含碳量的增加而持续提高。这是由于显微组织中珠光体所占的体积比不断增加的结果，而珠光体的强度大大高于铁素体的强度。因此，珠光体的体积比对于抗拉强度的增加具有深刻的影响。

然而在图 2.1-19 中可看到，屈服强度受含碳量影响相对较小，它在整个所示的含碳量范围里从约为 275MPa(40ksi)提高到约为 415MPa(60ksi)。这是因为一般认为铁素体-珠光体钢的屈服性受控于在显微组织中作为连续相(基体)的铁素体基体。所以珠光体在屈服特性中仅起次要的作用。

从图 2.1-19 中还能看到，由断面收缩率表征的塑性将随含碳量的增加而不断减小。w(C)为 0.10% 的钢的断面收缩率约为 75%，而 w(C)为 0.70% 的钢的收缩率只有 25%。总的伸长率也有类似的趋势，不过变化数值比断面收缩率小得多。

有关人员已做了大量的工作，旨在建立能表述铁素体-珠光体钢的强度、韧性与显微组织特征(如晶粒度大小、珠光体百分比及成分)之间的关系经验公式。下式是其中一个用于w(C)为 0.25% 以下的铁素体-珠光体钢的公式(参考文献[16])：

$$YS = 53.9 + 32.34w(\mathrm{Mn}) + 83.2w(\mathrm{Si}) + 354.2(N_f) + 17.4(d^{-1/2}) \quad (2.1\text{-}6)$$

式中，w(Mn)是锰的含量，w(Si)是硅的含量，N_f 是游离氮含量，d 为铁素体的晶粒大小(mm)。式(2.1-6)表示碳含量(珠光体百分比)对于屈服强度没有影响。而图 2.1-19 表明屈服强度随含碳量的增加有所提高。按照式(2.1-6)，锰、硅和氮如同晶粒度大小对屈服强度有显著的影响。然而对于大部分的铁素体-珠光体钢来说，氮的含量是十分低的(w(N)小于 0.010%)，因此对屈服强度的影响也很小。此外，如同下面将要讨论的，氮对冲击性会产生不利影响。

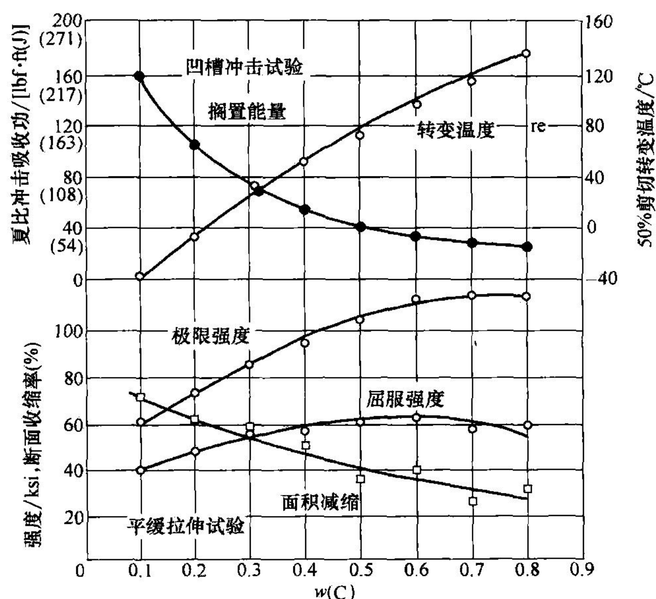


图 2.1-19　作为碳含量的函数的铁素体-珠光体的力学性能。引自参考文献[2]

下面是与式(2.1-6)中同样的钢的抗拉强度的回归方程式(参考文献[16])：

$$TS = 294.1 + 27.7w(\mathrm{Mn}) + 83.2w(\mathrm{Si}) + 3.9w(\mathrm{P}) + 7.7(d^{-1/2}) \quad (2.1\text{-}7)$$

式中，TS 是抗拉强度(MPa)，w(P)是珠光体含量。这样与屈服强度所不同的是，珠光体在显微组织中占的百分比对抗拉强度有重要的影响。

铁素体-珠光体钢的韧性也是其使用中的一个重要依据。人们早已知道，如含碳量增加，则夏比V形缺口试验中的吸收能量会随之减少，如图2.1-20所示。在表示冲击吸收功对试验温度关系的曲线图里，

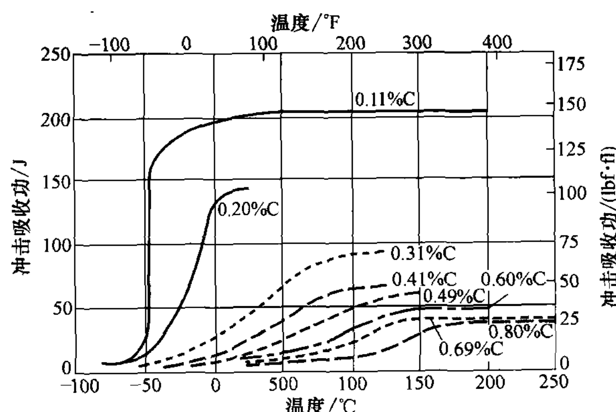


图2.1-20 铁素体-珠光体钢的含碳量对夏比V形缺口转变温度和架能的影响。引自参考文献[17]

其架能从w(C)为0.11%的钢的大约200J(150lbf·ft)减少到w(C)为0.80%的钢的35J(25lbf·ft)。还有，在这同样的含碳量变化范围里，其转变温度从大约-50到150℃(-60到300℉)。碳的作用主要通过它对显微组织里的珠光体百分比的影响所产生的。这也反映在下面转变温度的回归方程里(参考文献[16])：

$$TT = -19 + 44w(\mathrm{Si}) + 700(N_f^{1/2}) + 2.2w(\mathrm{P}) - 11.5(d^{-1/2}) \quad (2.1\text{-}8)$$

可以看出，在所有这些关系中，铁素体的晶粒大小对于提高强度和韧性都是一个重要的参数。而且还可以看出，珠光体有利于抗拉强度的提高，氮则有利于屈服强度的提高，而两者对于韧性都是不利的。因此在过去的25年里，控制铁素体-珠光体钢的晶粒度大小的方法得到了迅速发展。其中两种最重要的控制晶粒度的方法就是控制轧制法和微合金化法。事实上，在生产高强度和高韧性的铁素体-珠光体钢时，这两种方法结合使用。

控制轧制法。这是一种形变热处理方法，钢板在奥氏体重结晶温度下进行轧制。这种工艺使奥氏体的晶粒延伸。当进一步轧制并随即冷却到室温时，就会发生奥氏体向铁素体的转变。因为奥氏体晶粒的“薄饼”形状而使铁素体晶粒的大小在其生成过程中受到限制，由此生成铁素体细晶，从而满足其对高强度和高韧性的要求。

微合金化法。顾名思义就是加入少量的专门合金元素(钒、铌或钛)，以帮助延迟奥氏体的重结晶，从而为控制轧制提供更宽的轧制温度区间。在正常的热轧中，因为没有延迟重结晶，也就不可能形成薄饼形的晶粒，以致无法形成的细微晶粒。微合金钢广泛大量地应用于包括建筑业(桥梁、高层建筑等)所需的大批量结构钢、加强肋、气体输送管道以及许多锻造方面的用途。

贝氏体

像珠光体一样，贝氏体也是铁素体和渗碳体的复合物。不同的是其铁素体成为一种针状形态，并且碳化物是呈离散状的颗粒。由于这些形态上的差异，贝氏体具有与珠光体很不相同的性能特征。一般来说，贝氏体钢的高强度结合有高韧性，而珠光体钢虽有高强度，但韧性却很差。

贝氏体与珠光体之间的另一个差别就是相对珠光体的简单片状，贝氏体具有复杂的形态。关于贝氏体的形态至今学术界仍有争议。多年来，即自从贝恩(Bain)和戴文泼特(Davenport)在20世纪30年代所做的经典性工作以来(参考文献[18])，贝氏体分为两大类：上、下贝氏体。这得名于等温转变过程中，贝氏体所形成的温度区。上贝氏体等温地形成于400～550℃(750至1020℉)，而下贝氏体等温地形成于250～400℃(480至750℉)。图2.1-21所示就是上、下贝氏体的显微组织。可以看到，两种贝氏体均有针状的形态，但是上贝氏体比下贝氏体更为粗大。两种形态在显微组织中的实际差别只能由电子显微镜进行分析确定。图2.1-22是上、下两种贝氏体的透射电镜照片。在上贝氏体中，碳化铁相形成于板条的边界上；而在下贝氏体中，碳化物相则形成于板条内部特别结晶的惯习面上。鉴于这些形态上的不同，上、下贝氏体有着不同的力学性能。下贝氏体因其细微的针状组织和板条内的碳化物，而具有比组织粗大的上贝氏体更高的强度和韧性。

由于在制造过程中，大部分的钢都要承受连续的冷却而无法控制在等温里，而上和下又不便于对形态进行表述，所以使用上、下贝氏体的提法就极易混淆。贝氏体最近已被重新按其形态，而不是按其形成时的温度范围进行了分类(参考文献[19])。例如现在有一种分类方法是将贝氏体划分为三种不同的形态

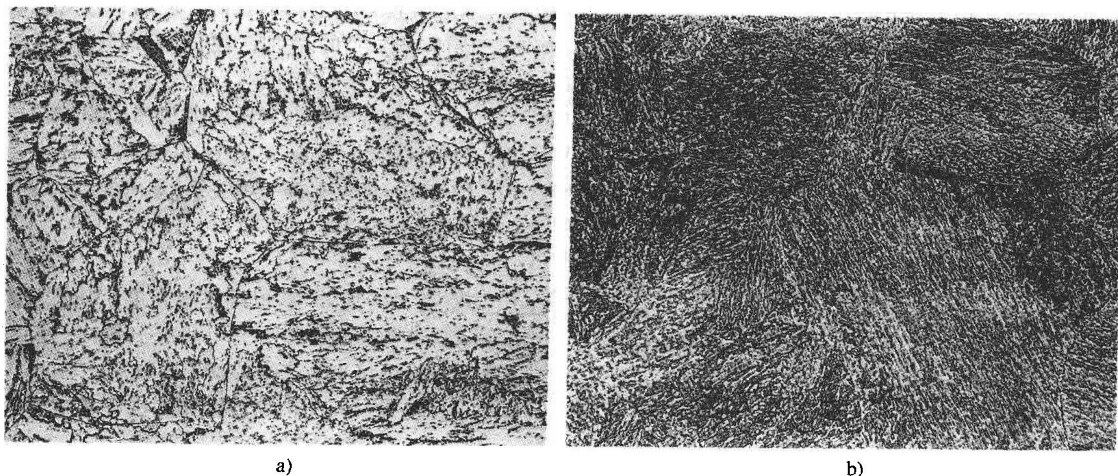


图 2.1-21　Cr-Mo-V 转炉钢的显微组织

a）上贝氏体　b）下贝氏体

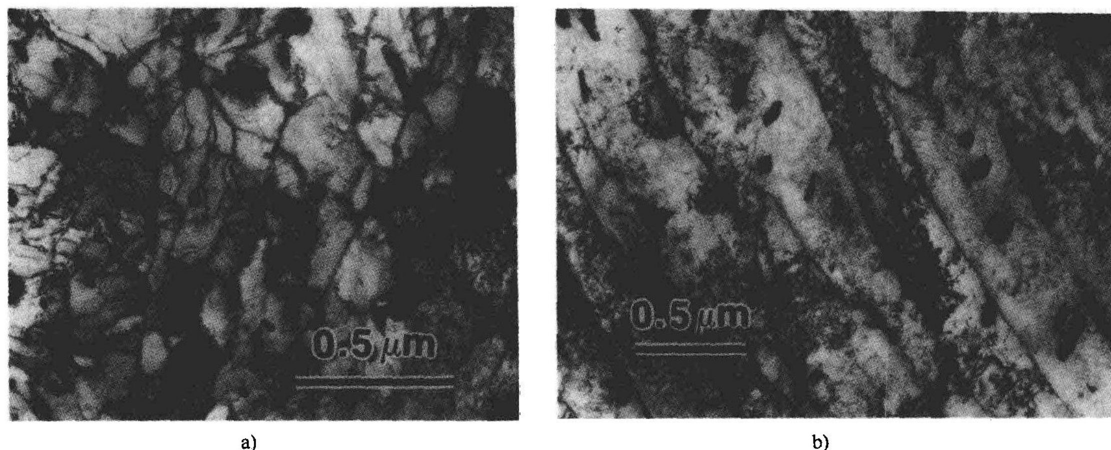


图 2.1-22　Cr-Mo-V 转炉钢的 TEM 显微照片

a）上贝氏体　b）下贝氏体

类别：

- 类别 1(B_1)：与板条内(片)的碳化铁(即渗碳体)相关的针状铁素体(代替下贝氏体)；
- 类别 2(B_2)：与板条内(片)的颗粒或渗碳体和/或奥氏体的薄膜相关的针状铁素体(代替上贝氏体)；
- 类别 3(B_3)：与一种由类似离散岛屿分布的奥氏体和/或马氏体相关的针状铁素体。

根据其显微组织的形态和成分，贝氏体有很广的力学性能范围，例如屈服强度为 450 ~ 950MPa(65 ~ 140ksi)，抗拉强度为 530 ~ 1200MPa(75 ~ 175ksi)。贝氏体钢的另一个特点就是作为单一成分，如½Mo-B 能在一个很宽的转变温度范围里产生贝氏体显微组织。图 2.1-23 所示就是这种钢的 CCT 图形。注意：对于这种钢，贝氏体转变起始(Bs)温度几乎总保持在 600℃(1110℉)不变。这个平坦的转变区域是很重要的，因为转变温度在显微组织的形成过程中起重要的作用。一个恒定的转变温度可以使得在一个较大的冷却速率范围里形成一种相似的显微组织及其性能。这对于贝氏体钢的生产有很多优点，对于较厚的截面，因为零件从表面到中心存在着很大的冷却速率范围，故更加突显其优越性。

当设计一种具有较宽转变温度的贝氏体钢时，关键是要让 CCT 图中的珠光体和铁素体区尽可能地往右边靠，即珠光体和铁素体只能以较慢的速率形成。为了同样的目的，还可以选用像镍、铬和钼(和锰)这样的合金元素。

低碳贝氏体钢的转变温度与抗拉强度之间的关系

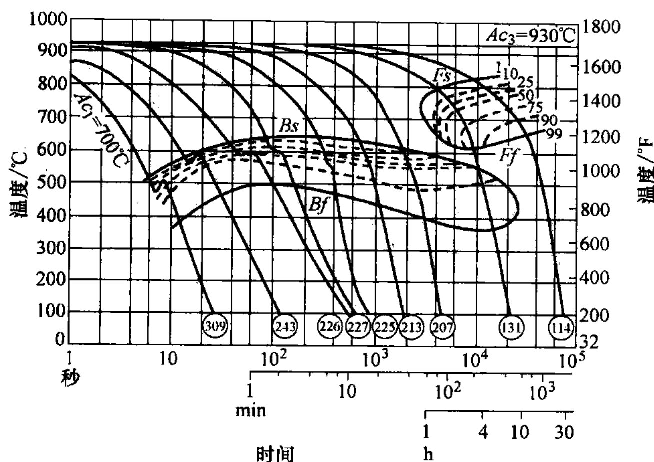


图 2.1-23　½Mo-B 钢的 CCT 相图。化学成分(质量分数)：0.093% C、0.70% Mn、0.36% Si、0.51% Mo、0.0054% B。在 Ac_3 +30℃下奥氏体化 12min。*Bs*，贝氏体转变开始；*Bf*，贝氏体转变结束；*Fs*，铁素体转变开始；*Ff*，铁素体转变结束。圆圈中的数字表示冷却到室温后的硬度(HV)。引自参考文献[20]

如图 2.1-24 所示(关于马氏体的将在下一节中讨论)。注意随着转变温度的降低，其抗拉强度得以迅速提高。对于这些钢，抗拉强度的回归方程由式(2.1-9)得出(参考文献[21])：

$$TS = 246.4 + 1925w(\mathrm{C}) + 231[w(\mathrm{Mn}) + w(\mathrm{Cr})] + 185w(\mathrm{Mo}) + 92w(\mathrm{W}) + 123w(\mathrm{Ni}) + 62w(\mathrm{Cu}) + 385[w(\mathrm{V}) + w(\mathrm{Ti})] \quad (2.1\text{-}9)$$

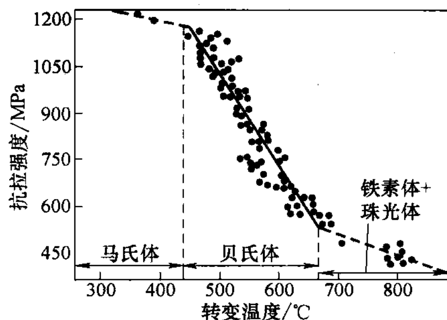


图 2.1-24　转变温度与铁素体-珠光体、贝氏体和马氏体钢之间的关系。引自参考文献[5]

除了碳、镍、铬、钼、钒等元素以外，为大家所熟知的还有极少量的硼(如 w(B) 为 0.003%)对于延迟铁素体的转变起着举足轻重的作用。于是含硼钢(如½Mo + B)CCT 图中的铁素体曲线的右移可使冷却速率减缓。硼延迟铁素体在奥氏体晶界上的形核作用，由此促使贝氏体形成(见图 2.1-23)。凡是要在钢里加入硼，都要防止它与其他元素(如氧、氮)相结合。一般为降低钢的氧、氮的含量，可先加入铝和钛。即使有了适当的预防，但随着含碳量和奥氏体晶粒度的增加，硼所起的效果还是要减小。

人们一直为在贝氏体的显微组织特征与其力学性能之间建立定量的关系而努力，式(2.1-10)就是这样一种关系(参考文献[22])：

$$YS = -194 + 17.4(d^{1/2}) + 15(n^{1/4}) \quad (2.1\text{-}10)$$

式中，*YS* 为 0.2% 相对屈服强度(MPa)，*d* 为贝氏体板条的大小(平均截距)(mm)，*n* 为所截平面里每平方毫米的碳化物数量。

作为贝氏体钢，贝氏体的板条宽度遵循图 2.1-25 所示的霍尔·皮奇关系。板条的大小与奥氏体晶粒度的大小有直接关系，而且随贝氏体转变温度的降低而减小。由于贝氏体显微组织的细密，其板条的大小和碳化物的密度只能用 SEM 和 TEM 的电子显微镜进行测量。

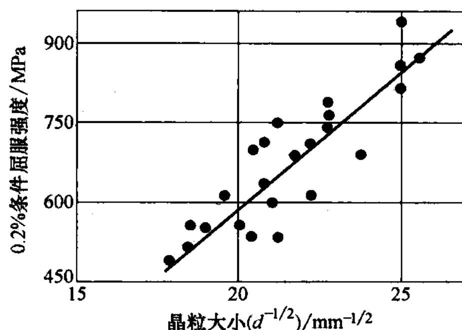


图 2.1-25　贝氏体板条宽度(晶粒大小)与屈服强度之间的关系。引自参考文献[5]。作为低碳贝氏体钢，B_2 类(上)贝氏体的韧性比 B_1 类(下)贝氏体的差

在低碳贝氏体钢中，B_2 类(上)贝氏体的韧性不如 B_1 类(下)贝氏体。它们两种钢的强度都随其转变温度的降低而增加。B_2 类(上)贝氏体的碳化物比 B_1 类(下)贝氏体的要粗大得多，故更易于产生裂纹，并导致初始解理(脆性)断裂。B_1 类贝氏体中的小碳化物较不容易发生断裂。通过较低温度的形变热处理和晶粒细化得到较细的奥氏体晶粒度大小，人们能借此使 B_1 类贝氏体钢的转变温度降低。

贝氏体钢有许多用途，包括压力容器、支承轧辊、汽轮机转子、滑模板、压铸模、核反应堆零件和工程机械设备。贝氏体钢的一个主要优点就是无需进行昂贵的热处理，就能实现强度和韧性的优化组合，例如马氏体钢则需要进行淬火和回火处理。

马氏体

马氏体基本上是一种碳在铁中过饱和的固溶体。马氏体中的含碳量远远超过铁素体里所含的。为此，正常的体心立方体(bcc)晶格为了容纳碳原子而发生扭曲。扭曲了的晶格变为体心四方体(bct)。在碳素钢和低合金钢里，一般是以非常快的速度冷却通过奥氏体相区(用水、冰水、盐水、冰盐水、油或适当的聚合物溶液淬火)而得到这种过饱和的，以避免生成铁素体、珠光体和贝氏体。有些高合金钢通过空气冷却也能生成马氏体(见本节后面所讨论的马氏体时效钢)。根据碳的含量，马氏体的淬火状态可以是非常硬而脆的，正是因为这种脆性，马氏体钢通常要进行回火处理，以便恢复一些塑性和增加一些韧性。

通过 CCT 图可以看出，碳素钢和低合金钢只有经过高速率的冷却才能生成马氏体。图 2.1-26 所示的4340 号钢的 CCT 图表明要超过大约 1000℃/min 的冷却速率才能生成马氏体。大部分生产用马氏体钢都含有特别加入的合金元素，以此在连续冷却的过程中遏制其他组分——即铁素体、珠光体和贝氏体——的生成。这就意味着这些组分是在较慢的冷却速率下生成的，而使马氏体能在较快的冷却速率(如通过油冷和水冷淬火)下得以生成。这个概念就叫做淬透性，基本上也就是钢通过快速淬火而被硬化的能力。几乎所有钢中常用的合金元素都有助于提高其淬透性，例如图2.1-26所示的 4340 钢含有相当量的碳、锰、镍、铜和钼，以增加其淬透性。有关淬透性还可详细参阅参考文献[2]。

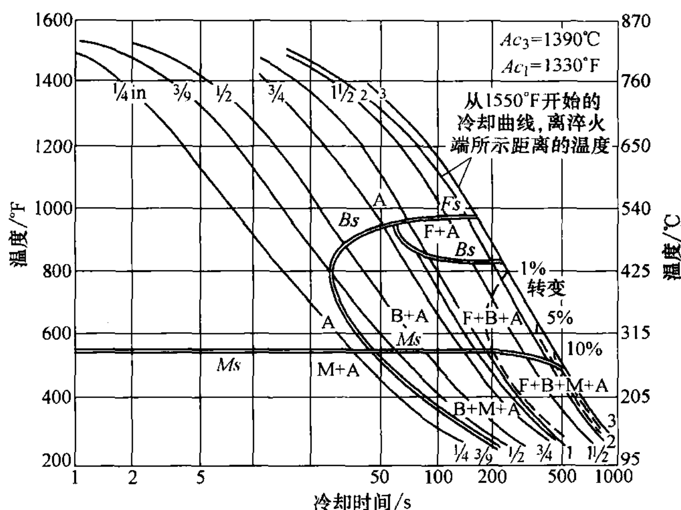


图2.1-26　4340 钢在845℃(1550℉)下奥氏体化的 CCT 相图。引自参考文献[23]

4340 钢的马氏体起始转变温度(*Ms*)为 300℃(570℉)。碳可以降低 *Ms* 温度，如图 2.1-27 所示，

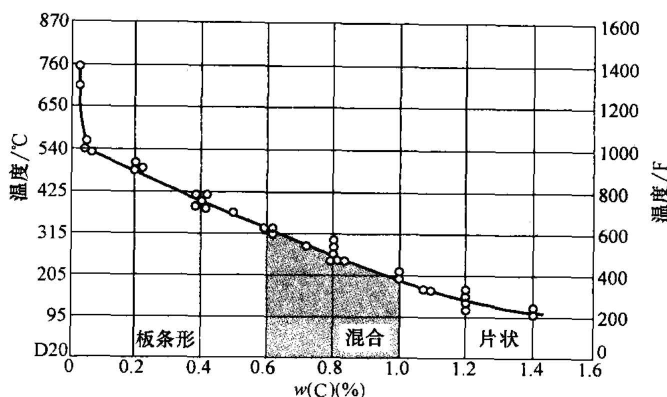


图 2.1-27　钢的含碳量对 *Ms* 温度的影响。引自参考文献[6]

如锰、铬、镍和钼的一些合金元素也能降低温度 *Ms*。在过去五十年里，提出了很多 *Ms* 温度与其成分相关的经验公式。最近由安德鲁斯(Andrews)提出下列公式(参考文献[24])：

$$Ms(℃) = 539 - 423w(C) - 30.4w(Mn) - 12.1w(Cr) - 17.7w(Ni) - 7.5w(Mo) \tag{2.1-11}$$

若有足够的合金含量，其温度 *Ms* 还可以低于室温，这说明转变是不完全的，钢中还存在一些残留奥氏体。

马氏体钢的显微组织一般可分成板条形马氏体、片状马氏体或板条形和片状相混合的马氏体。在碳素钢里，这种分类与含碳量有关，如图 2.1-27 所示。w(C)低于0.6%生成板条形马氏体，片状马氏体的w(C)大于1.0%，而两者混合型马氏体的 w(C)则为 0.6% ~1.0%。图2.1-28示出了一个板条形马氏体的例子，图 2.1-29 所示则是片状马氏体。一般来说，片状马氏体可通过其片上中脊的形貌与板条形马氏体相区分。片状马氏体还包含许多微裂纹，如图 2.1-30 所示，这些都是在转变过程中，由生长中的晶片撞击已生成的晶片而形成的。由于这些微裂纹，而导致片状马氏体一般难以在大多数的用途中得到应用。板条形马氏体的重要显微结构尺寸是其板条的宽度及板条束的大小。所谓一束就是有着同样方向的一组板条。

因为碳素钢和低合金马氏体钢的塑性差，故很少以淬火状态使用。为了增强塑性，这种马氏体要在 650℃(1200℉)以下进行回火(再



图2.1-28　典型的板条形马氏体显微组织。4%苦味醇溶液+HCl。200×



图2.1-29　典型的片状马氏体显微组织。4%苦味醇溶液+HCl。1000×

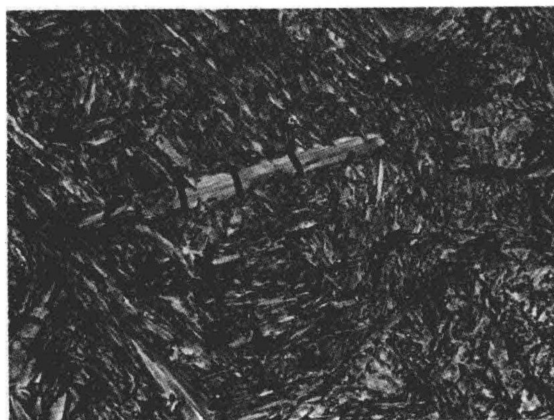


图2.1-30　在片状马氏体上形成的微裂纹。4%苦味醇溶液+HCl/二硫化钾腐蚀。1000×

加热）。在回火过程中，在固溶体里已过饱和的碳析出在马氏体晶格的择优晶面上（通常为八面体{111}平面）。因为其择优取向，回火马氏体里的碳化物具有如图2.1-31所示的特征排列。

回火马氏体具有类似B_1（下）贝氏体的形貌特征。然而其差别在于，碳化物析出方向的不同。将图2.1-22的B_1贝氏体与图2.1-31的回火马氏体进行比较，就能看出这种不同。如观察不到碳化物的形态，要区分B_1贝氏体和回火马氏体是非常困难的。

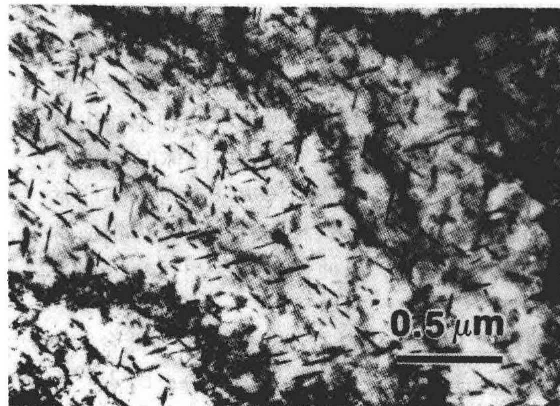


图2.1-31　回火马氏体的碳化物透射电镜照片

马氏体的硬度取决于它的含碳量如图2.1-32所示。w(C)为0.8%~1.0%的马氏体可达到其最高硬度66HRC。至于其硬度没有随含碳量的增加而均匀提高，是因为当w(C)超过0.4%时，有残留奥氏体的存在（奥氏体比马氏体软得多）。图2.1-33表明残留奥氏体的体积分数随含碳量的增加而增加。屈服强度也会随含碳量的增加而提高，如图2.1-34所示。式(2.1-12)表征了未经回火的低碳马氏体的屈服强度和含碳量之间关系（参考文献[25]）：

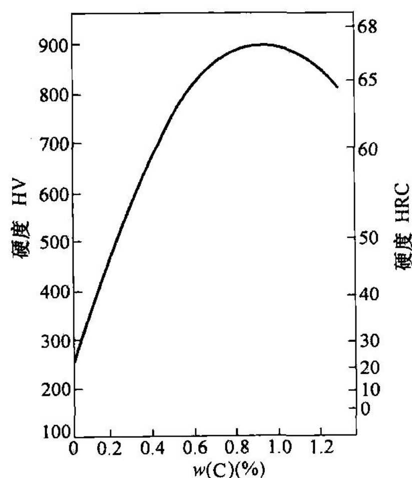


图2.1-32　含碳量对马氏体硬度的影响。引自参考文献[4]

$$YS(\text{MPa}) = 413 + 17.2 \times 10^5 [w(\text{C})]^{1/2} \quad (2.1\text{-}12)$$

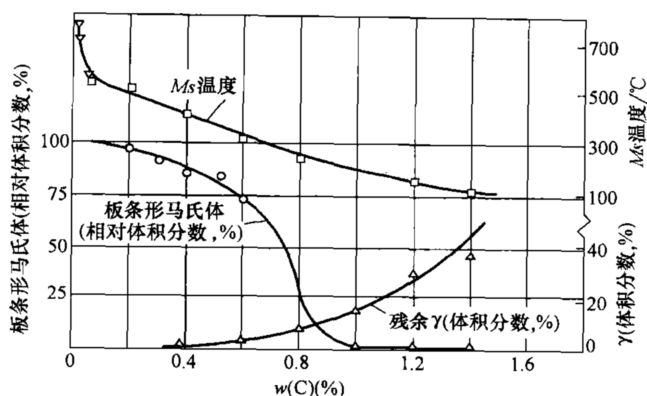


图2.1-33　经淬火马氏体的含碳量对残留奥氏体(γ)的影响。 引自参考文献[4]

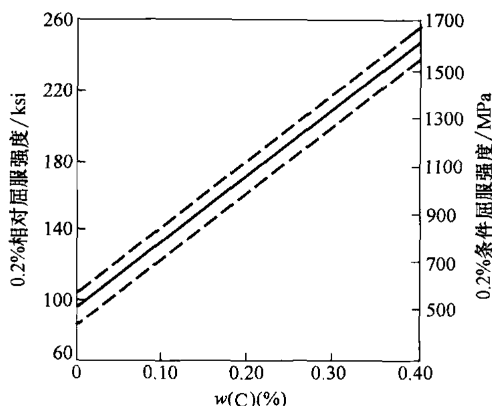


图2.1-34　马氏体的含碳量与屈服强度之间关系。 引自参考文献[4]

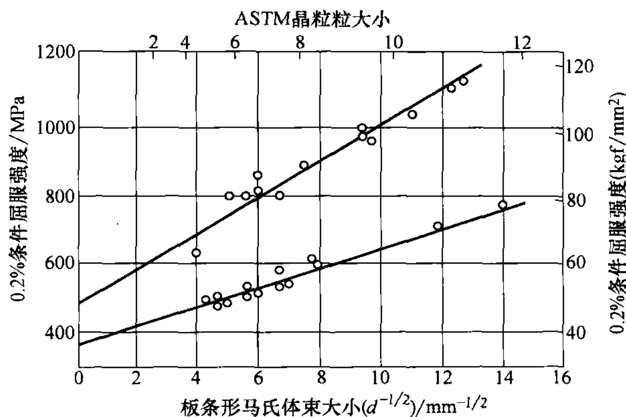


图2.1-35　板条形马氏体束大小(d)与Fe-0.2%C(上面的线)和Fe-Mn(下面的线)马氏体屈服强度之间的关系。 引自参考文献[2]

板条马氏体束的大小也会影响屈服强度，如图2.1-35所示。其线性度遵循霍尔·皮奇的关系($d^{-1/2}$)。

大多数的马氏体钢都是在回火状态下使用，即钢在其淬火之后再度加热至临界温度(Ac_1)以下的某一温度。图2.1-36所示是不同含碳量的马氏体钢的硬度随回火温度的升高而降低。碳素钢和低合金马氏体钢能在一个从较高到较低的温度范围里进行回火，所取温度决定于要求的各种性能间的调节。在150～200℃(300～390℉)之间的回火，将能保留淬火马氏体的大部分硬度，并少量地改善其塑性和韧性(参考文献[26])。这种热处理可以用于承受压缩载荷的轴承和齿轮。高于425℃(796℉)温度的回火能显著改善塑性和韧性，但是要牺牲一些硬度和强度。作为典型的油淬低合金钢(4340)，其回火温度对抗拉强度的影响如图2.1-37所示。这些数据都是出自油淬直径13.5mm(0.53in)的圆钢。经淬火的圆钢硬度为601HB。注意，当回火温度为650℃(1200℉)时，其硬度(见x轴)降低到293HB或不到淬火后硬度的一半。抗拉强度也由回火温度为200℃(400℉)时的1960MPa(285ksi)降低到回火温度为650℃(1200℉)时的956MPa(141ksi)。然而由总伸长率和断面收缩率代表的塑性却大为增加。回火过程将会因加入如钒、钼、锰、铬和硅等合金元素而得到延缓。再者，对于回火，其温度比保温的时间更为重要。

在合金钢和低合金钢的回火过程中，有可能发现回火脆性。当淬火-回火钢被加热到340～565℃(650～1050℉)或从该温度区间缓慢冷却时，会发生这种回火脆化。当脆化元素如锑、锡和磷集中在奥氏体的晶界上，并且产生导致晶间断裂的晶间偏聚时就会发生脆化。元素钼看来是有利于防止发生回火脆性。

马氏体调质钢所拥有的大范围的不同力学性能，为设计人员提供了大量的不同性能组合。如图2.1-37所示的数据在本手册第2篇第3章里，以及《ASM手册》第1卷和《ASM特种手册:碳素钢和合金钢(ASM Specialty Handbook:Carbon and Alloy Steel)》里都可以查到。调质钢的硬度可以用由格兰吉(Grange)等人所提供的方法进行估算(参考文献[27])。估算硬度的一般公式如下：

$$\text{HV} = \text{HV}_\text{C} + \Delta\text{HV}_\text{Mn} + \Delta\text{HV}_\text{P} + \Delta\text{HV}_\text{Si} + \Delta\text{HV}_\text{Ni} + \Delta\text{HV}_\text{Cr} + \Delta\text{HV}_\text{Mo} + \Delta\text{HV}_\text{V} \quad (2.1\text{-}13)$$

式中，HV为所估算的硬度值(HV)。

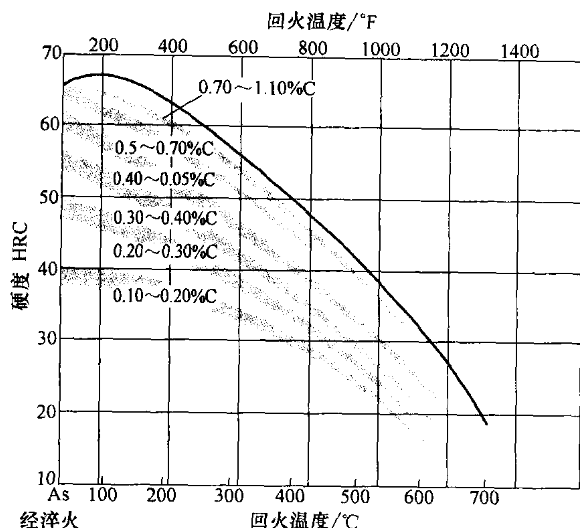


图 2.1-36　不同含碳量的马氏体硬度随回火温度的提高而降低。引自参考文献[2]

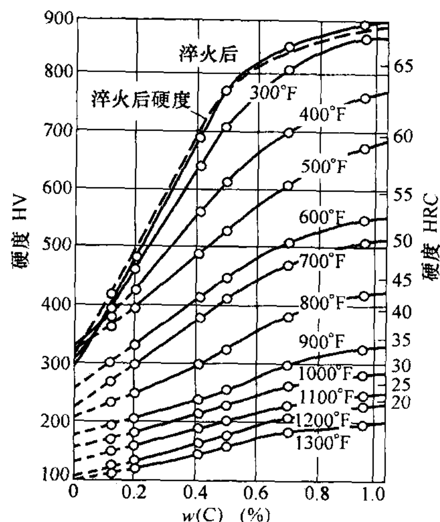


图 2.1-38　对于不同回火温度的回火硬度与含碳量之间的关系。引自参考文献[2]

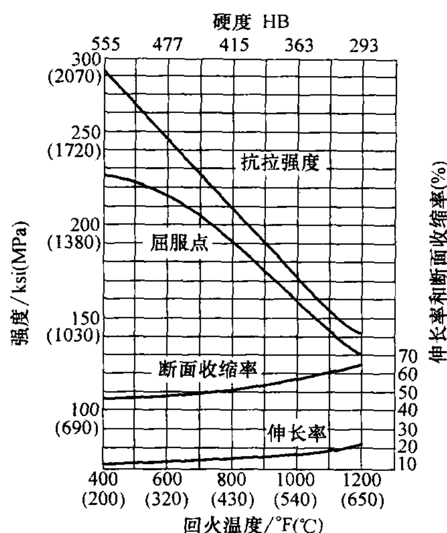


图 2.1-37　4340 号钢的回火温度对力学性能的影响。引自参考文献[2]

为了使用这个关系，必须由图 2.1-38 确定碳的硬度(HV_C)。例如假定回火温度为 540℃（1000℉），钢的 w(C)量为 0.2%，则回火后的 HV_C值为 180HV。再者，每一种合金元素的作用必须根据图 2.1-39 所示的这种图来确定。该图形代表的是 540℃（1000℉）回火温度。参考文献[27]里有代表其他温度的图形。

再利用图 2.1-37 所示的 4340 钢来说明 Grange 等人方法的应用。钢的成分（质量分数）为：0.41% C、0.67% Mn、0.023% P、0.018% S、0.26% Si、1.77% Ni、0.78% Cr 和 0.26% Mo。假设回火温度为 540℃

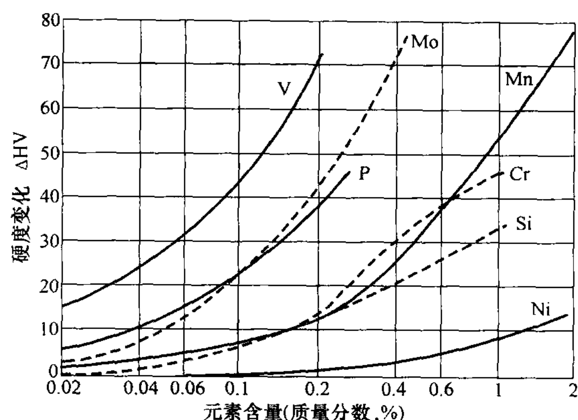


图 2.1-39　铁碳合金在 540℃（1000℉）回火过程中，合金元素对硬度延缓或软化的影响。引自参考文献[2]

（1000℉），则估算的 HV_C 为 210HV。图 2.1-38 中其他各合金元素的硬度值如下所列：

元　素	化学成分（质量分数,%）	硬度　HV
碳	0.41	210
锰	0.67	38
磷	0.023	7
硅	0.26	15
镍	1.77	12
铬	0.78	43
钼	0.26	55
总硬度		380

如图2.1-37所示，540℃(1000℉)温度时，回火后的硬度值为363HB(见沿x轴的布氏硬度值)。根据ASTM E140换算表(包含在钢的硬度换算表里，见本手册第1篇第1章)，布氏硬度363HB等同于维氏硬度383HV。计算值380HV(上表所列)是非常接近于实际测量值383HV。因此，这个方法可以被用于估算低合金钢调质处理后的具体硬度。另外，作为一种粗略的估算，可以用式(2.1-14)(根据ASTM E140换算表计算)所算来出的布氏硬度，进一步估算抗拉强度：

$$TS(\text{MPa}) = -42.3 + 3.6\text{HB} \quad (2.1\text{-}14)$$

还以上面4340调质钢(540℃或1000℉回火)为例，其硬度计算值为363HB，按式(2.1-14)则有抗拉强度1265MPa(183ksi)。而根据表2.1-1，4340调质钢(540℃或1000℉回火)的抗拉强度测量值为1255MPa(182ksi)。

由此可见，马氏体调质钢提供了一个很宽的性能范围。设计工程师可以从大量的碳素钢和低合金钢中进行选择。除了钢的这张大清单外，市场上还有另外两大类重要的全马氏体钢，即马氏体不锈钢和马氏体时效钢。

就像铁素体不锈钢一样，马氏体不锈钢(如403、410、414、416、420、422、431、及440钢)都属于高铬铁合金(w(Cr)为12%~18%)，但是要保持碳的特意加入量(w(C)为0.12%~1.2%)。这些钢都利用碳来稳定铁-铬合金(见图2.1-12)中的奥氏体。奥氏体的扩展区称为γ-回路。在Fe-Cr相图(不含C)中，γ-回路延伸到w(Cr)约为12%处(见图2.1-12)。有了碳的加入，奥氏体中w(Cr)可达到25%。这些钢就可以更像低合金钢一样地进行热处理了。然而，如此高铬含量的马氏体不锈钢即使有很厚的截面，也能在空气中冷却形成马氏体。马氏体不锈钢被认为是高强度不锈钢，是因为经过处理，其屈服强度能达到550(80)~1725MPa(250ksi)(表2.1-1)。另一方面，并不含有碳的铁素体不锈钢不能看成为高强度不锈钢，因为其屈服强度只有170~450MPa(25~64ksi)。马氏体不锈钢由于其高硬度和高强度再加上耐腐性，而被用于制造刀及其他要求有切削刃口的工件上，以及一些工具钢(如生产塑料零件的模具)。

马氏体时效钢是一种与马氏体钢不同类别的钢，被认为是超高强度的钢，其屈服强度高达2500MPa(360ksi)，如表2.1-1所示。除了有极高的强度外，马氏体时效钢还有优良的塑性和韧性。这些含碳量非常低的钢还含有(质量分数)17.5%~18% Ni、8.5%~12.5% Co、4%~5% Mo、0.20%~1.8% Ti和0.10%~0.15% Al。因为其高合金含量，尤其是钴的加入使它们变得非常昂贵。通过在850℃(1560℉)温度下的奥氏体化，然后冷却到室温形成板条形马氏体，它们由此形成高强度。然而马氏体时效钢中的马氏体组分比较软(28~35HRC)，但这也是优点，因为经直接冷却就可切削加工到最终形状。其最后的强化阶段就是在480℃(900℉)中保持3h的时效过程。在时效过程中，硬度约增加到51~58HRC，取决于马氏体时效钢的等级。时效处理促使杆状金属间化合物Ni_3Mo的析出。这些析出物只有在高倍下(如TEM)才能观察到。析出物在时效中形成时，能强化其周围的基体，甚至很厚的截面也能实现完全硬化。马氏体时效钢用于压铸模和铝热锻模，以及许多飞机和导弹的零件里。

奥氏体

奥氏体是不能在室温下存在于碳素钢和低合金钢中的，除了在快速冷却过程中尚有少量未曾发生转变的残留奥氏体。然而在某些高合金钢，如奥氏体不锈钢和海特菲尔德(Hadfield)奥氏体锰钢中，是以奥氏体作为其显微组织的。这些钢含有足够量的合金元素(如锰和镍)以稳定在室温下的奥氏体。相对铁素体的体心立方体(bcc)晶格，奥氏体是面心立方体(fcc)的晶体结构。fcc合金具有一些所需要的特征，如低温韧性、极佳焊接性以及无磁性。由于其高合金含量，奥氏体钢通常有耐腐蚀性。缺点是比较昂贵(因为合金元素)、对应力腐蚀开裂的敏感性(某些奥氏体钢)、相对较低的屈服强度以及它们无法强化，除非通过冷作硬化、间隙固溶强化或析出硬化的处理。

奥氏体不锈钢(例如301、302、303、304、305、308、309、310、314、316、317、321、330、347、348和384钢)一般都含有w(Ni)6%~22%的镍以稳定室温下的奥氏体。它们还含有其他的合金元素，如铬(w(Cr)为16%~26%)用于耐腐蚀，及少量的锰和钼。应用广泛的304号不锈钢含有(质量分数)18%~20% Cr和8%~10.5% Ni，故也称之为18-8不锈钢。由表2.1-1，退火状态的304号不锈钢的屈服强度为290MPa(40ksi)，其抗拉强度约为580 MPa(84ksi)。但是如图2.1-40所示的屈服强度和抗拉强度都可通过冷作硬化得到很大提高(表2.1-1)。然而强度的提高是以降低其塑性为代价的，例如，其伸长率从退火状态下的大约55%降低至经过冷作硬化后的大约25%。

有些奥氏体不锈钢(200、201、202和205钢)利用加入的氮进行间隙固溶强化。像铁素体一样，奥氏体也可以通过碳、氮的间隙元素进行强化。然而，碳因

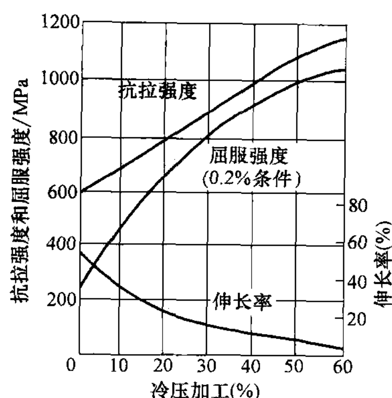


图 2.1-40 304 号不锈钢的冷作硬化对力学性能的影响。引自参考文献[4]

为与从奥氏体晶界上析出的碳化铬有关而会产生负面效应(一种称为敏感化的过程)，故一般不予采用。这些碳化铬会使铬的晶界区劣化，进而受到侵蚀的晶界又对腐蚀特别敏感。这种钢通过加热到高温使碳化物溶解，并让铬回到奥氏体的固溶体里，从而使这种敏感性得以减缓。另一方面氮在奥氏体里是可溶的，其加入可起到强化作用。为了防止氮形成有害的氮化物，可以加入锰来降低氮在奥氏体内的活性，并稳定奥氏体。例如 201 不锈钢的化学成分(质量分数)为：5.5%~7.5% Mn、16%~18% Cr、3.5%~5.5% Ni 和 0.25%N。其他 2xx 钢中的 $w(N)$ 都为 0.25%~0.40%。

还有一种重要的奥氏体钢，即奥氏体锰钢。它是由罗伯特·海特菲尔德于 19 世纪 90 年代后期开发的。这类钢液淬后还能保持奥氏体，故具有相当的强度和韧性。典型的海特菲尔德锰钢含有(质量分数) 10%~14% Mn、0.95%~1.4% C 和 0.3%~1% Si。为遏制碳化物的生成，有必要进行固溶退火；为稳定奥氏体必须让碳进入固溶体。当奥氏体完全形成时，这些钢就能通过加工硬化而获得较高的硬度和耐磨性。一种经加工硬化的海特菲尔德锰钢，具有在重载下的耐磨粒磨损能力。由于这种特性，它们是用于颚式破碎机及其他破碎机和采矿工业的研磨机件的理想材料。海特菲尔德锰钢长期以来就一直被用于铁路辙叉(用于两条铁轨接头处的机件)。

铁素体-渗碳体

当将碳素钢加热到刚刚低于下临界温度(Ac_1)就会发生球化过程。图 2.1-41 所示是完全球化钢的显微组织。在球化之前其显微组织为珠光体。在球化过程中，珠光体的渗碳体层片必定会将其形态改变为球状。该过程受制于碳的扩散率，部分层片必然被“夹断”(溶解)，所溶解的碳也就通过扩散将剩余部分的层片变成为球状。这个过程需要经过若干个小时。若开始的显微组织是马氏体或回火马氏体，则发生球化的时间会短一些。在此过程中，球化碳化物是借助在回火期间形成的碳化物的生长而形成的。

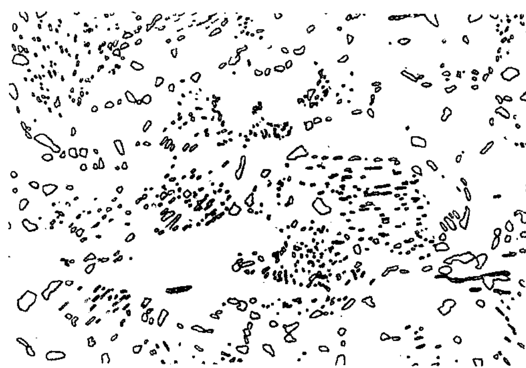


图 2.1-41 全球化钢的显微组织。苦味醇溶液腐蚀。1000×

完全球化组织可改善其切削性。钢的完全球化状态是其可能的最软状态。有些钢，如 1020 钢，要在冷轧成钢管以前进行球化，因为球化钢具有特别好的成形性。

普通的低碳钢、冷轧钢和退火钢薄板都具有含有少量晶界渗碳体的铁素体显微组织，如图 2.1-8 所示。这些碳化物在退火过程中形核，并生长在铁素体晶粒边界上，这个过程发生在亚温区的下面部分(即图 2.1-6 所示的铁碳图里 A_3 和 A_1 之间的区域)。许多现在生产的汽车钢板的含碳量都非常低，就是为了防止产生这些晶间碳化物，因为它们会使材料的成形性变差。

铁素体-马氏体

这是一类相对较新的、称之为双相钢的钢种，它是由在铁素体的基体里占据大约 15%~20% 的马氏体所构成的，典型双相钢的显微组织如图 2.1-42 所示。对于大部分的碳素钢和低合金钢，一般都要避免在显微组织里出现马氏体，因为马氏体会对塑性和韧性产生负面影响。然而当马氏体是镶嵌在铁素体的基体上时，它会赋予一些有用的特征。其中之一就是双相钢不会表现出屈服点。图 2.1-43 比较了四种钢的应力应变特性：碳素钢、SAE950X、SAE980X 以及第四种的双相钢(GM980X)，前三种钢都展现屈服点。这意味着在双相钢里并没有吕德斯带(Lüders bands)的存在，因为外观不为人注意的吕德斯带正是在间断屈服

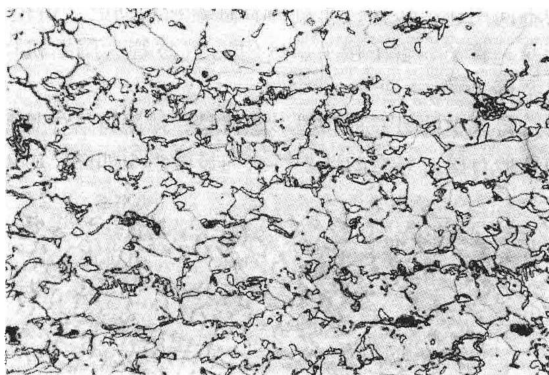


图2.1-42　典型双相钢的显微组织。2%硝酸乙醇腐蚀。250×

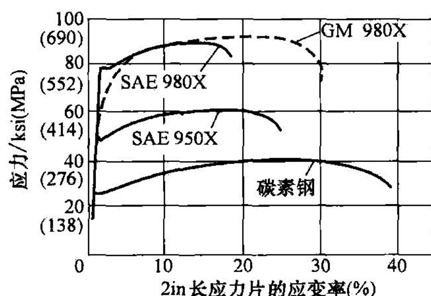


图2.1-43　三种易间断屈服薄钢板（碳素钢、SAE950X和SAE980X）和双相钢（GM980X）的应力-应变曲线的比较。除了塑性成形性不同外，与有相同抗拉强度、常用的SAE980X相比，双相钢具有更高的均匀延伸百分比。引自参考文献[2]

过程（即屈服点）中形成的。从图2.1-43还能注意到，双相钢的塑性大大超过具有类似抗拉强度的SAE980X。这些特性对于成形性特别重要。作为铁素体-马氏体双相钢的一个独特性能就是具有相当的冷作硬化能力，以使这种钢在变形的时候得到强化。利用这个特点，冲模经相应的设计就可以制造出高强度的零件。由于大部分传统高强度钢的高强度都是成就于其成形过程之前，因此它们的成形性都十分有限。

铁素体-奥氏体

称之为双相不锈钢的高合金钢具有大致相等比例的fcc奥氏体和bcc铁素体，并以铁素体作为其基体。图2.1-44所示的是一种典型的双相不锈钢的显微组织。虽然各相所占的精确量取决于成分和热处理，但大部分的合金还是被设计成各相在退火条件下具有大致相等的量。与奥氏体不锈钢比较，双相组织能促成其耐应力腐蚀性；与铁素体不锈钢比较，双相组织能改善其韧性和塑性。双相不锈钢在退火状态下，具有从400～550MPa（60～80ksi）范围的拉伸屈服强度的能力。

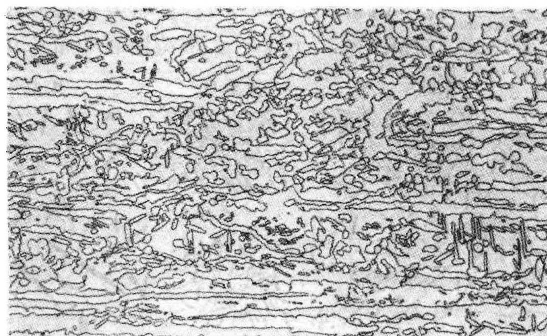


图2.1-44　典型的经轧制余热退火的双相不锈钢板的显微组织，可见经延展的奥氏体岛状分布于铁素体基体里。15mL的HCl在100mL的酒精腐蚀。200×

双相不锈钢的主要合金元素为铬和镍，但也加入氮、钼、铜、硅和钨，用于控制其组织的平衡并赋予某些耐腐蚀特征。以下是按照耐腐性增加而排列的四组双相不锈钢：

- Fe-23Cr-4Ni-0.1N
- Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N
- Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17N-Cu
- Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-W-Cu

因为其优良的耐腐蚀性，铁素体-奥氏体双相不锈钢在工业上有广泛的用途，特别是在油和气、石化、纸浆和造纸以及防污染工业等。它们通常用于含水、氯的环境里，并代替奥氏体不锈钢用于遭受应力腐蚀开裂和点蚀的情况下。

石墨

当铁碳合金的w(C)约超过2%时，就有形成石墨的趋势（见图2.1-6b中的Fe-C图）。在灰铸铁里尤其如此，这时石墨片的显微组织特征更为突出（见图2.1-3）。灰铸铁已经应用了数百年，因为它的熔化温度较低并容易被铸造成各种形状。而且石墨片具有很好的切削性并易于断屑，还能提供较好的缓冲能力。缓冲能力对于遭受震动的机器来说是很重要的。然而灰铸铁只能用于不要求韧性和塑性的用途里，例如总伸长率小于1%。石墨的片状形态在应力的作用下容易导致裂纹扩展。

灰铸铁通常含（质量分数）2.5%～4%C、1%～3%Si和0.1%～1.2%Mn。如图2.1-45所示，石墨片能以五种不同的形态存在。类型A因为随机取向和分布最适合于如内燃机缸体的许多用途。典型的灰铸铁基体

常是珠光体。然而可以通过专门的热处理来形成铁素体-珠光体和马氏体的显微组织。灰铸铁常以其高抗压强度而作为结构型材料被选用，其抗压强度范围为 572 ~ 1293MPa(83 ~ 188ksi)，尽管其抗拉强度只有 152 ~ 431MPa(22 ~ 63ksi)。灰铸铁有非常广泛的不同用途，包括汽车缸体、缸盖和制动鼓、铸模、床身、管子、管子接头、进(排)气歧管、压缩机以及泵等。

铸铁中的另一种石墨形态就是在球墨铸铁中见到的球形石墨。典型的球墨铸铁的显微组织如图2.1-46

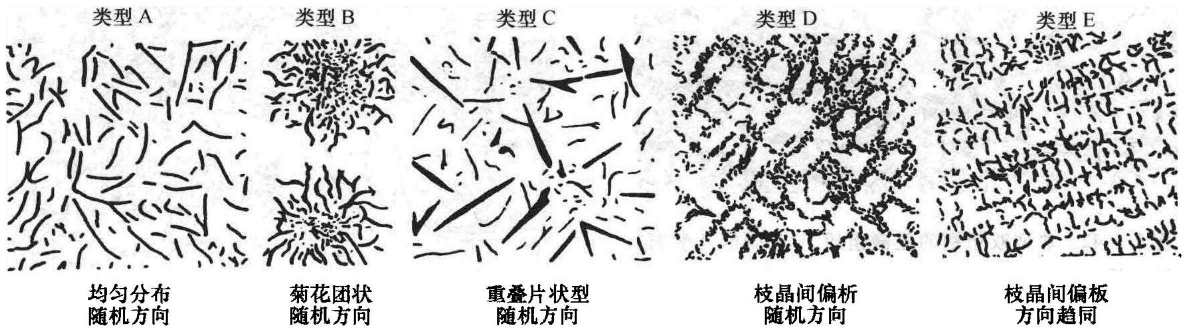


图2.1-45 不同石墨片形态分类

所示。这种形式的石墨是通过一种称为孕育的过程而生成的，其过程就是在浇铸前直接把镁或铈注入熔化的铁液中。这些元素形成金属间化合物，并起到使石墨形核于其表面的作用。由于石墨呈球状形态，不再像灰铸铁里的片状石墨那样使铸铁表现出脆性，所以球墨铸铁比灰铸铁有高得多的塑性和韧性，并且大大扩展了这种铁合金的用途。大部分的球铁铸件都是以铸造形式使用。但是，也可以通过热处理改变其基体的显微组织以获得所要求的性能。基体可以是全铁素体、全珠光体、全马氏体以及全贝氏体，这取决其成分和所采用的热处理。典型的球墨铸铁的屈服强度为 276 ~ 621MPa(46 ~ 76ksi)，其抗拉强度为 414 ~ 827MPa(60 ~ 120ksi)。总伸长率为 3% ~ 18%。经热处理后的等温回火球墨铸铁的屈服强度为 505 ~ 950MPa(80 ~ 138ksi)，抗拉强度为 860 ~ 1200MPa(125 ~ 174ksi)，并且总伸长率为 1% ~ 10%。球墨铸铁的应用包括齿轮、曲轴、造纸厂干燥辊、阀体与泵体、转向机枢轴、摇臂以及各种机器零件。

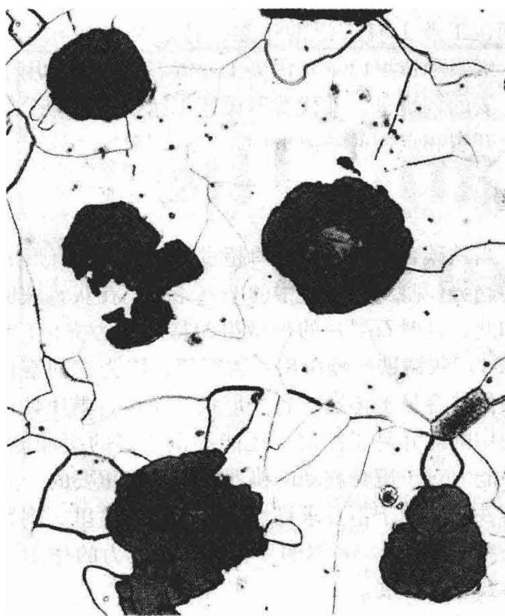
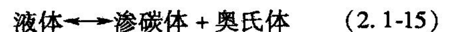


图2.1-46 典型的球墨(可延)铸铁，石墨呈球状。2%硝酸乙醇腐蚀。200×。借用 Lehigh 大学，A. O. 本斯高特

渗碳体

白口铸铁的显微组织的主要组分是渗碳体。典型的白口铸铁的显微组织如图 2.1-47 所示。渗碳体是在凝固过程中通过共晶反应而生成的：



$$\text{液体} \longleftrightarrow \text{渗碳体} + \text{奥氏体} \qquad (2.1\text{-}15)$$

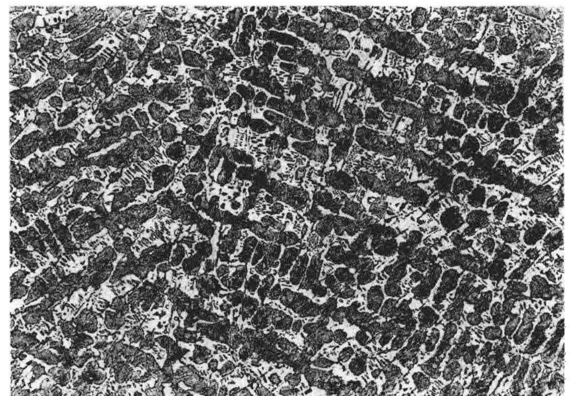


图2.1-47 典型白口铸铁显微组织。4%苦味醇溶液腐蚀。100×借用 Lehigh 大学，A. O. 本斯高特

白口铸铁中的共晶组分叫做莱氏体，即如图2.1-48所示的在白色基体中分布较小颗粒的双相形态。共晶体正如图2.1-6b里Fe-C二元相图中所示的。共晶体中的奥氏体(及初晶相中的奥氏体)会转变为珠光体、铁素体-珠光体或马氏体，这取决于冷却速率和成分。由于渗碳体的高含量，白口铸铁用于要求极佳的耐磨损和耐磨粒磨损的用途里。这些铁里有高含量的硅、铬、镍和钼，故也称为合金铸铁。其用途包括轧钢机轧辊、球磨机及采矿业用的颚式破碎机。硬度是白口铸铁的基本力学性能，其珠光体白口铸铁的硬度为321~400HB，而合金(马氏体)白口铸铁则为400~800HB。

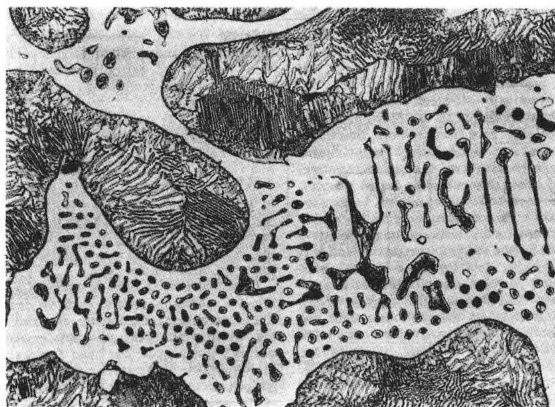


图2.1-48　在典型白口铸铁中的莱氏体共晶组分。4%苦味醇溶液腐蚀。500×借用Lehigh大学，A. O. 本斯高特

参考文献

[1] P.D. Harvey, Ed., *Engineering Properties of Steel,* American Society for Metals, 1982.

[2] G. Krauss, *Principles of the Heat Treatment of Steel,* American Society for Metals, 1980.

[3] R.W.K. Honeycombe, *Steels—Microstructure and Properties,* American Society for Metals, 1982.

[4] W.C. Leslie, *The Physical Metallurgy of Steels,* McGraw-Hill, 1981.

[5] F.B. Pickering, *Physical Metallurgy and the Design of Steels,* Applied Science, 1978.

[6] G. Krauss, Microstructures, Processing, and Properties of Steels, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys,* Vol 1, *ASM Handbook,* 1990, p 126.

[7] E.C. Bain and H.W. Paxton, *Alloying Elements in Steel,* 2nd ed., American Society for Metals, 1961, p 62.

[8] *Microalloying 75,* Conference Proceedings (Washington, D.C., Oct 1975), Union Carbide Corp., 1977, p 5.

[9] T.B. Massalski, J.L. Murray, L.H. Bennett, and H. Baker, Ed., *Binary Alloy Phase Diagrams,* Vol 1, American Society for Metals, 1986, p 822.

[10] W. Heller, R. Schweitzer, and L. Weber, *Can. Metall. Q.,* Vol 21 (No. 1), 1982, p 3.

[11] J.M. Hyzak and I.M. Bernstein, *Metall. Trans. A,* Vol 7A, 1976, p 1217.

[12] G.F. Vander Voort and A. Roósz, *Metallography,* Vol 17 (No. 1), 1984, p 1.

[13] H. Ichinose et al., paper I.3, *Proc. First Int. Heavy Hauls Railway Conf.,* Association of American Railroads, 1978, p 1.

[14] G.F. Vander Voort, Ed., *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels,* ASM International, 1991, p 570.

[15] B.L. Bramfitt, *Proc. 32nd Mechanical Working and Steel Processing Conference,* Vol 28, ISS-AIME, 1990, p 485.

[16] F.B. Pickering, *Towards Improved Toughness and Ductility,* Climax Molybdenum Co., 1971, p 9.

[17] G.J. Roe and B.L. Bramfitt, Notch Toughness of Steels, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys,* Vol 1, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 739.

[18] E.C. Bain, *The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy,* TMS-AIME, 1963, p 121.

[19] B.L. Bramfitt and J.G. Speer, *Metall. Trans. A,* Vol 21A, 1990, p 817.

[20] G.F. Vander Voort, Ed., *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels,* ASM International, 1991, p 249.

[21] W. Steven and A.G. Haynes, *J. Iron Steel Inst.,* Vol 183, 1956, p 349.

[22] R.W.K. Honeycombe and F.B. Pickering, *Metall. Trans. A,* Vol 3A, 1972, p 1099.

[23] G.F. Vander Voort, Ed., *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels,* ASM International, 1991, p 544.

[24] K.W. Andrews, *J. Iron Steel Inst.,* Vol 203, 1965, p 271.

[25] G.R. Speich and H. Warlimont, *J. Iron Steel Inst.,* Vol 206, 1968, p 385.

[26] G. Krauss, *J. Iron Steel Inst. Jpn., Int.,* Vol 35 (No. 4), 1995, p 349.

[27] R.A. Grange, C.R. Hribal, and C.F. Porter, *Metall. Trans. A,* Vol 8A, 1977, p 1775.

第 2 章　钢的冶炼及其对性能的影响

B. Mishra

科罗拉多矿业学校

冶金和材料工程系

铁与钢的现代生产工艺可以用图 2.2-1a 和 2.2-1b 所示的流程简图予以概括，它们代表实际生产所有各种钢产品的步骤顺序。铁液通常也叫生铁，是用铁矿石、石灰石和煤炭（焦炭）在高炉里冶炼得到（见

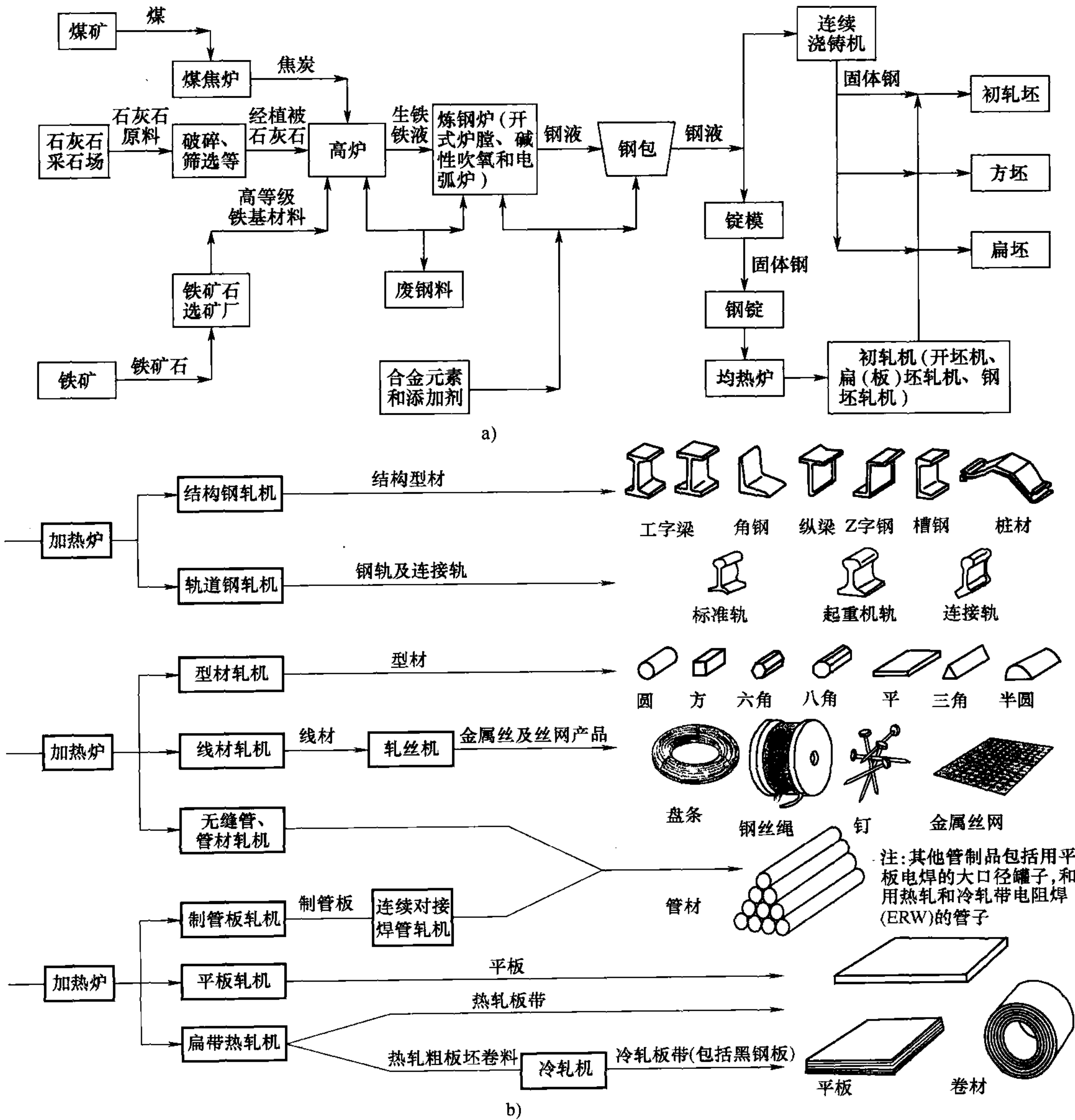


图 2.2-1

a）钢铁冶炼的流程图　b）将粗钢加工成轧制品的主要工艺流程图

图2.2-1a)。生铁由于有过高含量的硅、锰、碳以及其他元素，还要把铁液连同废铁料和熔剂一起装入碱性氧气顶吹转炉或电弧炉里，与氧气进一步精炼以减少硅、锰和碳的含量，使其达到成品钢所要求的低水平。然后钢液流入或被倒入用耐火材料衬壁的钢包中。在钢液流入的过程中，将合金元素加入钢包，对里面的物料进行脱氧还原，这些合金元素决定了钢的最后化学成分及性能，并由此对其最终的质量、成形性和成本施加主要影响。经过钢包处理后，还要进行在图2.2-1a中没有出示的再熔化/精炼的补充工序，随后再将钢液浇注成钢锭或者直接进行连续浇铸。如图2.1-1a的右下部分所示，钢锭要经过初始轧制（钢锭被切断），再加工成半成品形状（大钢坯、初轧坯和扁坯）。而连续浇铸则不需初始轧制工序，半成品即进行热轧。一些扁平的产品还可以进行冷轧。图2.2-1b所示是将粗钢加工成为不同轧制成品的工艺。

炼铁

物理化学

原材料。现代的钢铁冶炼技术已发展了七个世纪（参考文献[1]~[3]）。目前生产生铁所要求的原材料为铁矿石、煤、石灰石和空气。市场上重要的铁矿石为赤铁矿（Fe_2O_3）、磁铁矿（Fe_3O_4）和褐铁矿（$HFeO_2$）及其富集化。铁矿石也以部分还原和熔化的烧结形式以及团块矿和球团矿的集块化形式投入使用。

用于生产焦炭的优质煤炭的特点是低含量的灰分（质量分数<15%）、惰性材料和硫，同时有高含量的固定碳（参考文献[4]）。煤的焦化是在炼焦炉里进行的，以此生产出冶金用焦炭，作为固体燃料，它在炼铁反应炉内的空气中燃烧，并由其生成一氧化碳气体的初级还原剂。也正是焦炭里的碳，在高炉中起到将氧化铁还原的作用。

石灰石（$CaCO_3$）和白云石（$(Ca、Mg)CO_3$）是炼铁所使用的普通熔剂。这些碳酸盐大都要在高炉外经过煅烧，从而能在吸热的、压力敏感的分解反应中起作用。熔剂的基本功能就是将矿石中由二氧化硅和氧化铝构成的杂物、硫及焦炭中的灰分都熔结在一起。通过这种熔结生成炉渣并分离出来，同时产生生铁铁液并含有一定量的硅、硫和锰。在炉内平均温度为1200℃（2190℉），并有70m³/s（150000scfm）压力风速的热空气为焦炭的燃烧提供氧气，使气体在炉内保持对流，用于部分地满足作为一般炉子对于热量的需求。

高炉的炉衬是用二氧化硅-氧化铝耐火砖砌成的，其炉膛用碳砖制成。正如前面已述，高炉的产品是生铁铁液，而铁液又用于进一步炼钢。液态炉渣积聚在高炉的底部并覆盖于炉膛里的铁液上面，从炉顶则可收集有热量价值的气体副产品。高炉的生产率是以每天反应炉内的单位体积所能生产的液态金属或生铁来计量的。具有一般效率的高炉生产率为每天2~3t/m³。

高炉里的化学反应。炉料的配制装载基本上决定了与温度相关的炉子还原能力。炉内的温度分布必须保证炉子里需要进行还原和熔化的区域有足够的热量。炉渣的过早生成和熔化都会造成装载量的不规则下降。现代高炉都应使焦炭和熔剂的消耗、气体带走的热量达到最小，以此提高生产率。不难看出，降低的焦炭和熔剂消耗率可以提高炉里的铁块体积。

在高炉的炉身里（见图2.2-2）存在着气体与固体的对流。当氧从固体转移到气体中时，热量则发生从气体到固体的转移（参考文献[5]）。在炉子风口前因鼓风而有丰富的氧气，故在风口前产生二氧化碳（CO_2）[反应1，式(2.2-1)]；但因为热力学平衡条件立即通过反应2（式2.2-2）变成一氧化碳（CO）。碳燃烧所产生的高发热量会引起风口前的温度，即所谓的理论燃烧温度（RAFT）超过2000℃（3630℉）。在炉身

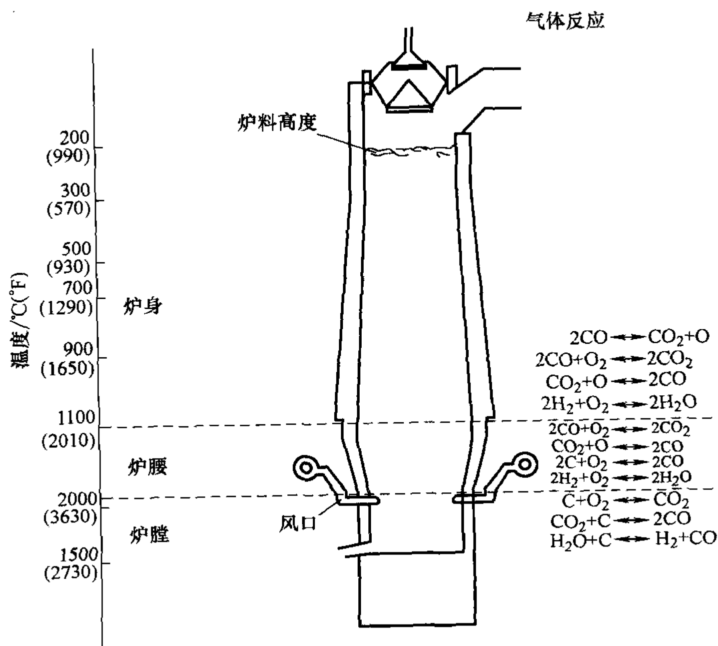


图2.2-2 高炉的结构示意图。依图所示，气体反应为温度的函数

里主要发生两种类型的气-固化学反应，即焦炭被 CO_2 氧化成 CO 气体和在高温下因过量碳的存在而促使氧化铁被一氧化碳还原(参考文献[6]~[8])。这些反应表达如下：



$$C + O_2 \longleftrightarrow CO_2 \quad (2.2\text{-}1)$$

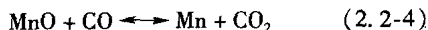


$$CO_2 + C \longleftrightarrow 2CO \quad (2.2\text{-}2)$$

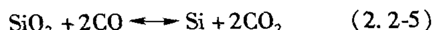


$$3CO + Fe_2O_3 \longleftrightarrow 2Fe + 3CO_2 \quad (2.2\text{-}3)$$

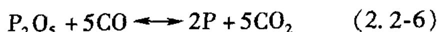
反应2，即所谓的“溶解损耗”反应，也就是碳在到达风口之前就已经损耗了。这种吸热反应会因温度的提高、压力的降低以及 CO_2 对 CO 的高比值而增强。经铁或氧化铁催化的逆反应发生在较低的温度下，并造成碳的沉积。温度超过600℃(1110℉)，由一氧化碳将氧化铁还原的反应分为三步，Fe_2O_3 被还原成 Fe_3O_4、FeO 直至最终成为铁。除了将氧化铁还原外，一氧化碳还把矿石夹杂物里以及焦炭灰分里的锰、硅和磷的氧化物进行还原：



$$MnO + CO \longleftrightarrow Mn + CO_2 \quad (2.2\text{-}4)$$



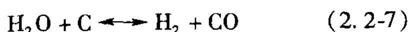
$$SiO_2 + 2CO \longleftrightarrow Si + 2CO_2 \quad (2.2\text{-}5)$$



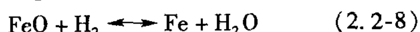
$$P_2O_5 + 5CO \longleftrightarrow 2P + 5CO_2 \quad (2.2\text{-}6)$$

锰、硅、磷和硫在金属和炉渣中的分布主要取决于炉渣的温度和成分(碱度)以及炉膛里的氧势。液态金属通常以碳饱和。高炉对于降低金属中的磷无能为力，但是其状态却适合于对硫的控制。通常在炼钢的过程中都要检测液态金属中硅和锰的含量。

热高炉里的水蒸气也会对还原反应起重要的作用，如氢气是由碳将水还原而产生的。氢气可作为一种有效的还原剂起作用，尤其在炉里较低的温度下：



$$H_2O + C \longleftrightarrow H_2 + CO \quad (2.2\text{-}7)$$



$$FeO + H_2 \longleftrightarrow Fe + H_2O \quad (2.2\text{-}8)$$

在炉子里，正是由热吹气流促成的碳的氧化反应和一些有一氧化碳参与的还原反应为炉料的干燥、石灰石的分解和热耗的补充提供热量，并且为铁液、外逸气体和炉渣提供适当的热量。

炉渣化学。炉渣是通过熔剂与矿石中的夹杂物、燃料中的灰分或者在金属冶炼过程中被氧化了的夹杂物所发生的化学反应而产生的可熔性物质。炉渣中的化合物是通过酸性氧化物和碱性氧化物之间发生的中和反应所产生的。如果在高炉的炉料中用的是熔化烧结块，则在其炉腰部分(见图2.2-2)首先形成的炉渣是属于 $FeO\text{-}CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ 类型的。其具体成分取决于矿石中各种夹杂物的含量和炉里气体的还原程度。当这种炉渣进入与焦炭接触时，能将 FeO 还原，而炉渣则变为 $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}MgO$ 类型的。当焦炭灰分进入熔剂以后，炉渣就在炉膛里最后形成。构成 $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}MgO\text{-}CaS\text{-}MnO$，这种最后炉渣的成分取决于炉渣所要求的碱度和温度，而炉渣反过来又控制锰、硫和硅从液态金属中的分离。作为典型，它含有40%(质量分数)的二氧化硅和氧化钙以及较少量的氧化镁、氧化铝、硫化钙和氧化锰。由于不希望存在高氧化铝难熔炉渣，因此在铁矿石的选矿过程中要去除一些氧化铝。

对于高炉的炉渣主要有两种考虑：一个是能在炉膛温度里熔化，并不会阻碍炉内装料自由下落的炉渣；另一个是控制炉子出铁的成分，特别是硅和硫的含量。氧势、温度和碱度也是决定炉渣具有能控制液态金属的硫、锰和硅的含量能力的因素。

反应炉的物理状态。高炉从结构上可以划分为三个区域。在炉膛里，紧挨着风口前达到最高温度(>2000℃或3630℉)。然后在同一水平面上到接近炉子中心线处，温度快速下降(达到1600℃或2910℉)。倒截锥部分是炉腰，在此以上部分是炉身(见图2.2-2)。到炉腰的顶面时，温度均匀地降至约1100℃(2010℉)，而到炉身的中部时，温度约为800℃(1470℉)。到炉顶时，温度约达到250℃(480℉)。在风口的小半径范围内，吹进气流中的氧气在与焦炭装料的反应中全部消耗掉，在此外面的区域里，CO_2 与较多的焦炭反应生成一氧化碳。在温度高于1000℃(1830℉)处的 CO_2 浓度可忽略不计，故含碳气体的总压等于一氧化碳的分压。在400~1000℃(750至1830℉)，这两种气体的分压都十分显著。总气压通常接近于炉身顶部的大气压力，而在约含有60%(体积分数)的 N_2 的风口水平位置上的气压介于1.3~1.5atm之间。温度状态和 $CO\text{-}CO_2$ 的平衡决定了高炉内任何部位的氧势。炉子还原铁矿石的能力和速度决定于温度、氧气的扩散、由还原反应而引起的体积变化量、氢气的可达性、炉渣形成的开始、用固体碳的还原反应、矿石夹杂物的存在以及预还原的烧结材料应用。除了所产生的液态金属和炉渣的温度和成分以外，CO/CO_2 比值的也是分析高炉性能的一个很好指标。

生铁的成分

装料平衡。生铁铁液或液态金属里的主要夹杂物为碳、硫、锰、硅和磷。锰、硅和磷是以氧化物存在于矿石里，而碳和硫则为焦炭所含。在焦炭的灰分里也含有氧化硅。作为一种典型的液态金属含有(质量分数)1.0%~2.0%Si(取决于高炉的运行工况、炉渣化学和炼钢对热量的需求)、0.1%~0.5%P、0.04%~0.07%S、0.75%~1.25%Mn和高达4.5%C。一般碳以接近其所在温度的溶解极限溶解于铁液中。碳在炉

渣中是不可溶解的。氧化磷被还原后，磷溶解在铁液里。高炉炉渣不适用于去磷。硫大部分都作为硫化钙转变为炉渣了。对于硫转变为炉渣而言，还原炉工况、高温和炉渣的高碱度（CaO/SiO_2）都是其有利条件（参考文献[9]）。所以，在炼钢中，由于其强氧化工况而无法取得良好的脱硫效果。

系统里的氧势将影响所有的元素在金属和炉渣之间的配置分布。氧势将有利于液态金属里对硫的控制，但并不适合硅和锰的去除。当炉膛区里具有一定的碳活性和一氧化碳分压时，温度的提高将有助于锰、硅和硫的分离出来。炉渣里不同氧化物的活性以及不同溶质的活性系数都是决定夹杂物在生铁里分布的重要因素。现已建立了炉渣成分与氧化物组分的活性以及炉渣的硫化能力（参考文献[14]）之间关系的经验公式。石灰和氧化镁含量的增加能提高硫化能力。为促使高炉中更多的硫分离出来，将要求液态金属有较高的碳活性。如果需要一种低硅、低硫的液态金属，就有必要在炼钢以前对液态金属进行预处理（见"液态金属的预处理"）。采用低灰分、低硫的焦炭对于炼制低硫生铁也是必要的。其他在炉渣和金属之间分离的重要溶质是铬和钛。正常情况下约有50%~60%（质量分数）的铬被还原进入液态金属。氧化钛被还原成碳化钛和碳氮化物。有时在炉中装入二氧化钛基的矿石，以保护炉膛不至于因炉渣和金属所造成的粘滞而遭受侵蚀。

先进的高炉技术

过去四十年来，以炉子单位体积的金属产量为指标的高炉生产率和燃料消耗量有了长足的进步。这些进步是多项技术提高的结果。采用高强度与高碱度烧结矿可获得更高的火焰熔烧温度，通过洗煤、配料可降低灰分和硫分，压实（压紧）装载有利于焦化作用，焦炭颗粒大小均匀化有利于提高焦炭强度和炉子透气性，使用可滑动的炉喉护板可使装载顺序优化从而有利于合理的炉料分布等，都是一些炉料装载方面的进步。

高达1250℃（2280℉）的高热吹风已在全世界许多高炉里得到普遍应用，这与高炉的焦炭利用率有直接的关系。碳氢燃料的喷注技术的采用正是因为已具备使用高温吹风的能力和有控制火焰温度需要。这些发展既增强了炉腰气体的还原能力，又降低了焦炭的消耗率。天然气、焦化炉气、油、煤焦油和煤粉或油-煤浆都已经被作为高炉的补充燃料得到了有效的应用。火焰温度控制方法的开发也使吹气中氧气得到富化。一般，每增加1%的氧就可以根据炉料的还原性使高炉生产率提高2%~4%。

高的炉顶压力承受能力使其能使用较高的风速而不至于抬高炉料。当炉内气体受到压缩时，高炉的生产率会有相应的提高。现在炉顶压已成功地达到205MPa（30psi）。这些发展也使得废气处理系统的改进成为必要。

液态金属的预处理

由于硫、硅和磷元素在炉渣和金属之间分离时，分别要求的工艺条件常常是相互矛盾的，所以高炉并非总能按照这些元素的含量要求生产铁液。因为矿石里的高夹杂物含量和/或焦炭里的高硫含量，液态金属里会存在高含量的上述溶质。因此，在液态金属被用于炼钢之前，要对液态金属进行预处理。预处理可以分别在高炉的铁液流槽、液态金属的浇包或混铁炉里进行，因为这三个阶段的温度是不同的。高炉的流槽还为反应剂与液态金属之间提供一个较大的反应区。混铁炉的碱性耐熔炉衬和通过形成石灰-富氧化物的炉渣可以降低硅、硫和磷的含量。因此可以把一种氧化铁和石灰的组合原料，如助熔烧结矿、石灰和热轧钢锭表面的氧化皮或石灰和铁矿石细末，加入混铁炉的铁液里，以此进行有效的混铁炉操作。

鉴于超低硫含量钢的要求，采用浇包脱硫更为重要。将石灰苏打灰、氧化钙、碳化钙或它们的混合物随空气通过一根浸没在液态金属的浇包里的吹管注入。钙作为脱硫剂起作用，并生成硫化钙。使用石灰或碳化钙作为反应剂可以分别得到0.015%和0.008%的硫含量（质量分数）。使用石灰-苏打灰的混合料是最经济的方法，其脱硫动力学可被有力地强化。

代用铁原料

直接还原铁。为了使用低档的矿石和不太适合高炉的燃料品种，需要探索代用的铁原料。通过低于铁的熔点进行还原生铁的生产工艺一般被归类为直接还原法，其产品称为直接还原铁（DRI）或海绵铁。类似于高炉液态铁的这种生产熔化铁的工艺归类为熔炼还原法。这些工艺通常又将固态还原步骤和液态熔化、成渣步骤分别在两个反应炉里进行，从而不必预制高效炉料。直接还原铁1996年的世界年产量约为3400万t，占世界总的炼铁能力的5%~6%。直接还原铁大都代替废铁用于炼钢炉里。低价的废料和高成本的电力影响了DRI在工业化国家的应用，对于拥有便宜的天然气和水电资源、缺乏焦化煤却有适用矿石储量的国家，则宁可采用这种不同于高炉的炼铁方法。

DRI生产的化学反应与高炉里的很相似。当在低于约1000℃（1830℉）的温度下进行的还原反应并以

氢气(在外部生成)作为主要还原剂时，生产得到的产品呈疏松状。当气体进行还原时，金属铁还吸收了一些碳后生成含1%~2.5%(质量分数)碳化铁的渗碳体。当用纯一氧化碳还原致密的Fe_2O_3时，在700℃(1290℉)温度下还原反应进行到约40%就停止了，在800℃(1470℉)下则停止在接近85%的程度，不过在更高的温度下就可以充分完成了(参考文献[16])。超过1000℃(1830℉)，碳与水分、CO_2发生反应生成CO和H_2，从而更新了气体的还原势。直接用固体煤而无需将其固定碳预先进行气化的工艺，需要用超过1000℃(1830℉)的温度。在用煤将氧化铁还原的情况里，碳与氧化铁颗粒之间的反应仅在接触点开始发生，但是作为中间相的金属铁一旦形成，其反应就中断。此后，只有因为碳原子通过金属铁的层面向残余氧化物里扩散的结果才使还原得以继续。因此，无论是以固体还是液体作为还原剂的直接还原过程，最重要的就是将还原剂转化为还原气体。

1200℃(2190℉)被认为是直接还原法的上限温度，超过该温度所形成的金属铁将吸收碳，造成固体的熔融和熔化。于是直接熔化法的使用将伴生>1300℃(2370℉)的产品，因为碳被迅速吸收，并形成高温液态金属。表2.2-1列举了气基和煤基的直接还原法以及电力和燃料基的熔化-还原法。对于所有这些近期的发展可以参阅参考文献[17]。

表2.2-1 现有直接还原和熔化还原工艺的分类

直接还原法——由还原炉外生产的还原气体	**直接还原法——在还原炉内由碳氢化合物产生的还原气体**
动床竖井炉法	窑式炉法
威伯格-苏德福斯(Wiberg-Soderfors)	卡拉帕-瑞恩(Krup-Renn)
米特利克斯(Midrex)	卡拉帕-CODIR(Krupp-CODIR)
HYL Ⅲ	SL/RN
阿姆科(Armco)	旋转-炉膛法
NSC	INMETCO
皮洛夫(Purofer)	赛勒姆(Salem)
静床竖井炉法	蒸馏法
HYL Ⅰ和Ⅱ	霍根纳斯(Hoganäs)
流化床法	金洛-米特(Kinglor-Metor)
FIOR	动床竖井炉法
HIB	米特利克斯-电热式(Midrex-Electrothermal)
直接熔化法	**等离子法**
电炉熔化法	非传递电弧
生铁电炉	等离子熔化
DLM	等离子加热
氧燃料熔化系统	可传递电弧
INRED	ELRED
KR	EPP
川崎(Kawasaki)	SSP
CGS	托伦托系统(The Toronto system)
	下垂膜等离子反应炉

引自参考文献[17]。

可以用若干指标评价直接还原法的有效性。利用总含铁量和似金属的铁(包括渗碳体)含量导出一个工业上有用的金属化级别指标。作为正常的金属化级别介于90%~95%，具体取决于原始氧化铁的还原性和所选用的工艺。还原百分比用于度量在还原过程中所去除的氧量。DRI中夹杂物含量、硫的含量(特别是对煤基DRI)及煤粉的用量，都会影响以DRI为原料的炼钢反应炉的生产率。

动床和静床的两种竖井炉和流化床法都是用于生产DRI的，而且都使用了炉外生成的还原气体。在DRI的生产中，如直接使用煤作为其燃料，则都使用窑式炉、旋转炉或蒸馏炉。在所有煤基直接还原法中，经粒度分选的矿石和按粗略比例配制的非焦化煤均以要求的比例从入口端加入。气基直接还原法的发展比

煤基法更为适用，因为它更易于工艺控制，反应炉有较高的有效性、较高的能效以及产品中较低的硫和较高的碳。此外，窑式转炉的生产率为每天0.3～0.5t/m^3，而相比之下天然气基工艺可达每天2t/m^3。

熔化还原法。这是一种利用坑式电炉生产铁液的工艺。将经团聚化的炉料或块状矿石、煤或焦炭及石灰石直接装入炉里。苏德伯格(Soderberg)的连续自焙炭电极利用埋弧的基本原理。作为电弧炉的变型，它在熔化还原过程中还使用了含氧燃料的熔化系统。由煤和氧通过闪熔而成的精矿是在能提供将近90%的过程能量的第一阶段里完成的。在此阶段矿石预还原成FeO。在第二阶段，经预还原和加热的材料主要通过与碳的直接还原而得到进一步的还原，然后被熔化。熔化还原的COREX(或KR)法是在两个分离的反应炉(见图2.2-3)里像高炉一样地进行预热、气体还原和熔化的。最主要的是，该工艺由一个两阶段的工序组成，即DRI未经冷却就被从竖井炉装入与之相连的具有3～5atm的熔化炉的燃气发生器里。

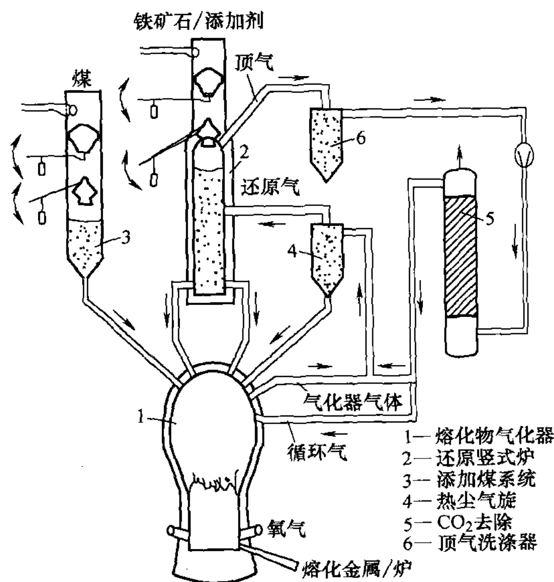
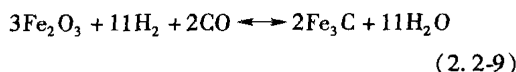


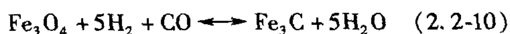
图2.2-3 COREX熔化-还原过程的示意图

现在又开发了几种新的等离子还原法，可直接使用未经预处理的炉料生产铁液。还有多种的熔化还原法目前正处于不同的生产开发阶段。其中，有几种是通过工艺排气的能量回收来实现其技术的先进性。虽然焦化已不是必要的，但是某些工艺的应用还是因为可供使用的煤中含有的灰分和挥发性成分而受到限制。熔化还原法对于铁合金生产还有很大的潜力可发挥。

碳化铁。在碳化铁里，已经找到另一种很有前景的铁原料，它是在流化床的反应炉里，通过用氢气对铁矿石粉末进行还原，随后再用一氧化碳进行碳化而生产得到。这种工艺所生产的碳化铁粉硬而不脆、抗氧化，具有代替DRI、废料和铁液生产低成本钢的潜力。这种工艺常用的控制温度为600℃(1110℉)，压力为1.8atm，生产得到的材料为7%C和93%Fe(质量分数)。用赤铁矿和磁铁矿粉末生产碳化铁的反应如下：



$$3Fe_2O_3 + 11H_2 + 2CO \longleftrightarrow 2Fe_3C + 11H_2O \quad (2.2\text{-}9)$$



$$Fe_3O_4 + 5H_2 + CO \longleftrightarrow Fe_3C + 5H_2O \quad (2.2\text{-}10)$$

结合在碳化铁中的碳构成一种潜在能源，经过这种能源预热并能达到1200℃(2190℉)的碳化铁，构成了氧气炼钢所用的100%炉料(参考文献[18])。其年平均每吨的资金成本只约有高炉和焦化炉组合的三分之一和目前DRI工厂生产的一半。它还可以生产高质量的钢，因为碳化铁并不含有夹杂物元素，而且也不含硫。从式(2.2-9)和式(2.2-10)中可看到，在碳化铁的生产过程中，水是其惟一的副产品。

炼钢

从前面的章节已经知道，炼铁的终端产品是通过大生产能力的高炉生产的铁液，或通过生产能力较小的直接或间接还原工艺所生产的海绵铁。液态钢是炼钢所得到的终端产品，随后浇铸成钢锭或进行连续浇铸。经过发展而且若能完全成功，就可以消除熔化还原或直接炼钢的这种鲜明差别。可以广义地将炼钢分为两个步骤：在转炉或炼钢炉里进行初炼，然后在钢包里进行二次冶炼。一般牌号的钢可以跳过二次冶炼过程。最重要的两种炼钢工艺就是电弧炉炼钢法(EAF)和碱性氧气转炉炼钢法(BOF)或LD法(Lin-Donawitz,林兹-多纳维兹)。EAF法生产的钢占世界钢产量的35%～40%，而BOF法生产的钢占55%～60%。还有些其他工艺，如平炉炼钢在一些国家还在应用，用于生产一些特种钢。

碱性氧气转炉炼钢法(参考文献[19])

炉料组成。氧气炼钢法使用气体氧作为基本的自供式发热剂，即由存在于液态金属中和溶解于炉渣中的夹杂物，如碳、硅、锰、硫和磷通过氧化产生热量，并通过铁的氧化达到一定程度。顶吹是氧气炼钢法中最普通的方式，但是底吹及其两者结合也都属于不同方式的应用。在顶吹过程中，用一根插在里面的水冷吹管将氧气以超声速的速度从炉口吹进去。炉子是采用碱性耐火材料，如用焦油粘结的白云石或镁碳砖作为炉衬。炉料由废料、液态金属和熔剂构成，全部从炉口倒入转炉。当废料既作为铁块的原材料又作

为冷却剂加入时，有时还要在炉子里装一些铁矿石作为供氧源。石灰石是造渣的主要熔剂，但还要加入氟石和氧化硅，这取决于炉渣的要求。通常废料占金属炉料的10%~30%，有助于控制由发热氧化反应所产生的热量。对熔剂的要求和生成的炉渣数量，则主要取决于液态金属的成分。

过程的描述。图2.2-4所示的是BOF示意图。使转炉倾斜大约30°~40°，用加料斗将废料倒入炉内。废料通常是按照其成分的组分进行筛选，并预先分类。再把液态金属倒入废料里。然后让炉子回到原来的垂直位置以便吹氧。一个氧气吹管渐渐降低到离液面下规定的距离，同时开始吹入氧气。在开始的5min里，通过机械化料斗将全部石灰倒入，使硅、锰和铁的氧化物熔化。所形成的石灰硅酸盐炉渣主要含CaO、SiO_2、FeO、MnO和P_2O_5。经过规定的时间后，吹管再逐渐下降到最低的位置，也就是碳被氧化为一氧化碳和二氧化碳的地方。在炉顶的废气中，仅有不到10%的CO_2，在吹气的过程中由安装在炉口顶上的排气罩收集其废气。根据夹杂物含量和吹管的设计，总的吹气时间控制在17~22min。吹管从最低位置上升。1650~1700℃(3000至3090℉)的钢液开阀灌入钢包，并倾斜炉身排出炉渣。其耐火材料仅当第一次从冷态开始才需要进行预热。在此之后，热量就会连续地产生直至需要更换耐火炉衬。

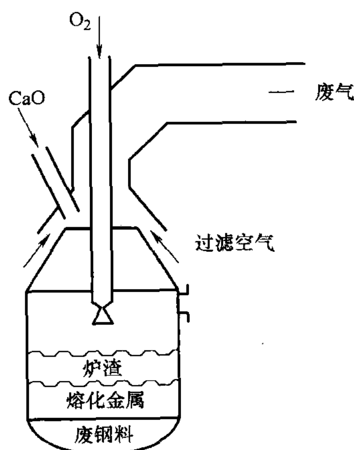


图2.2-4 碱性氧气吹转炉的示意图

一般钢的最低点成分含量(质量分数)为0.04%~0.05%C(称之为"调节"碳)、0.2%Mn、0.02%的P和S，均取决于所用炉料的成分。由于在吹气的过程中气流对金属表面、金属的演变和炉渣成分的影响，以及气体-金属-炉渣间的互动作用，从而导致金属熔滴的生成，是一种决定转炉效率的重要工艺特征。在钢的冶炼过程中，气体-金属和气体-炉渣的反应有：

- 铁液中所溶解的碳、硅、锰和磷被氧气的氧化。
- 炉渣中的FeO和MnO被上升的CO/CO_2气泡还原。
- 氢、氮等气体在钢液中的溶解。

图2.2-5所示是在BOF转炉里熔融金属的成分和炉渣成分的演变。该图表明在一开始吹气的3~4min里，硅首先被氧化。然而，在整个吹气的过程里，都发生着硫、磷、锰和碳的转变。随着吹气的进行，石灰(CaO)逐渐熔化进入炉渣，并且在整个吹气的时间里，由于石灰和氧化铁的溶解，炉渣的量不断增加。液体金属的温度从吹气开始时的1250~1400℃(2280~2550℉)逐渐上升到吹气结束时的约1600~1700℃(2910~3090℉)。

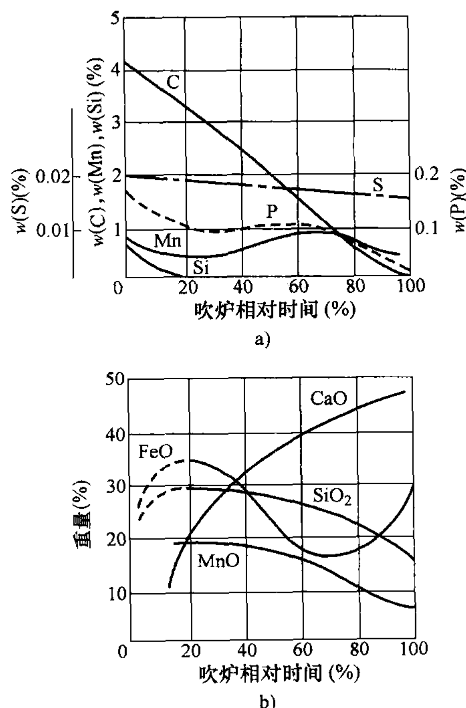


图2.2-5 氧吹转炉中的函数关系

a) 钢液成分与吹炉时间 b) 炉渣与吹炉时间

在开始吹气时，吹管头离熔融金属表面的距离保持得比较高，然而吹管随着炉渣里FeO和SiO_2的增加而降低。当吹气至三分之一的时候，炉渣开始发泡，并且炉渣中的FeO含量也开始减少。当吹气超过四分之三时，其脱碳率下降，并且炉渣中的FeO含量不断增加以容纳大部分不再用于碳氧化的氧气。快到吹气结束时，FeO增加的速度将主要取决于吹管的高度、金属的含碳量、未能溶解的石灰数量及炉渣的粘度。不难看到，炉渣中的FeO含量直接影响转炉的生产率。氧气在钢液中的活性平衡取决于碳含量

的调节(参考文献[20])。

当吹气结束并将吹管抽出后，用浸没式热电偶测量温度，并在5min之内对熔融金属的样品进行化学分析。如果熔融金属的温度太高，则将矿石和石灰石作为冷却剂加入。如温度太低，则有必要进行短时间的再吹。利用液态金属和废料的一次热平衡装料来对BOF的温度进行控制，从而在调节中达到所要求的成分和温度。BOF成品是完全由计算机控制的。

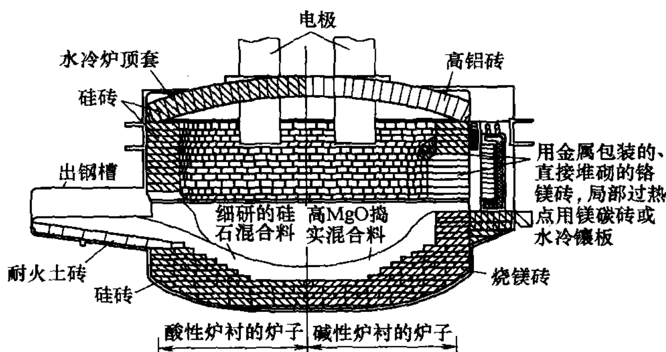


图2.2-6　典型的电弧炉的截面示意图，示出了所用的不同耐火材料

工艺能力。碱性氧气工艺有以下特征：①使用气体氧作为单一的冶炼剂；②一次装载大量的熔化转炉铁；③在一个低的表面对容积比的熔融金属里进行快速化学反应，以使外部热量损耗为最小。碱性氧气转炉炼钢是一个依靠液态金属里的夹杂物氧化而进行的自热过程，因此一定量的热态炉料是必不可少的。成品钢液出炉的重要属性在于其碳、氧及其他夹杂物气体含量的高低和出炉的温度，它们将影响二次炼钢。氧和碳含量的控制与铁作为炉渣中FeO的损耗有关，这种损耗是并不希望的。液态金属里的高硅含量会要求更大量的石灰进行熔化，并因此降低转炉的生产率，因为炉渣需要在炉内占据更大的容积。另一方面，若要冶炼低硅的液态金属，有必要加入砂子为熔炼反应制造足够量的炉渣。硫和磷的控制对于钢的性质也很重要。因此，就生产率而言，BOF反应炉的能力要受到液态金属的成分、出渣率、含碳量要求以及出炉温度的限制。

电弧炉炼钢(参考文献[21])

炉子描述。以经典转炉/BOF整合的钢铁厂，都具有一种EAF/连续浇铸微型轧钢生产线的现代化工艺配置方式。作为炼钢，一般都采用三相交流直接式电弧炉、直流直接式电弧炉和感应电炉。在三相交流直接式工艺电弧炉里，电流从一个电极向下经由一个电弧和金属炉料，再从炉料向上经过一个电弧到达另一电极。在直流直接式电弧炉里，电流从一个电极经由一个电弧和金属炉料到达位于炉底的电极。在低、中和高频感应炉里，是通过震荡磁场在钢里感应生成电流。间接式电弧炉是利用辐射发热对炉料进行加热，这时电弧通过炉料在两个电极之间被直接触发。这些炉子都不是普通炼钢所用的。目前高合金钢、不锈钢、轴承钢和其他高质量的钢，以及低合金钢和碳素钢都用EAF方法生产。

图2.2-6所示的是EAF截面示意图。生产用的EAF炉几乎都是用经烧制的菱镁土碱性耐火材料作为炉衬或用铬镁氧化砖直接堆砌而成的，而炉顶是用高铝砖砌成的。所有的钢锭浇铸、连续浇铸及大部分牌号的铸钢都是在碱性炉衬的炉子里生产的，它可以熔化高合金废料以及碳素废料。碱性炉能使用成分范围很大的废料生产钢，另外还有提炼高硫和高磷钢液的优点。在这种使用含硅炉渣的酸性工艺中，因其氧化较快和炉渣量较少而损耗较少的铁，故炼一炉钢所要求的时间也较短。

炉料制备。废料的筛选对于电炉的炉料制备具有重要的作用。对废料进行依其牌号分选：①保留废钢料中有用的合金成分含量；②经济地使用原来的合金；③保证最后的炼钢成品中只含有所要求的合金元素。结合精密的光谱化学分析以及采用砂轮火花鉴别的方法进行在线分选。炉料还要通过按大小和体积密度的分选对其进行适当的配比。若仅使用轻废料(线材盘条、车床切屑和冲压废料等)，将因为在炉里占据较大的容积空间而降低其生产率，且轻废料还容易氧化；轻废料作为初始炉料，还会因电弧会击穿金属炉料而损坏炉膛。然而全部用重废料(钢锭、铸块和切料头等)也不适合，炉子的炉顶和炉壁因为没有保护而造成耐火材料的损坏。最好使用混合型的废料，这样可得到最佳的金属熔化、功率利用和电极消耗，而且成本最低。

直接还原铁可以部分或全部代替废料作为电炉炉料使用。由于为人熟知的成分均匀、不含如铜、镍、锡或铬等残余元素的优点，而常常首选DRI。直接还原铁还因为碳和氧化铁的存在而有助于发泡炉渣的形成。一般根据两种材料的价格使用30%的DRI和70%的废料的混合炉料。

装料顺序。电弧炉有可移动的炉顶，故废料能快且又容易地装入炉内。废料使用底开式料斗装料。大而重的废料利用磁铁慢慢地置于炉底。很难氧化的合金材料，如铜、镍和钼可以在熔化前装入炉里。在熔

池里最好有过量的碳以帮助熔化，熔化也是通过吹入氧气和加入矿石得以进行。如果金属炉料中的碳不足，可以用焦炭或废电极作为增碳剂加入，使熔化了的熔融金属的含碳量比成品钢所要求的$w(C)$约高出0.20%。作为脱碳剂，最好是注入氧气而不是加入轧钢屑(氧化皮)或矿石。如果用DRI作为金属炉料，则应当在整个熔化期通过敞开的炉顶加进去。熔剂随同金属炉料一起加入，并且要使其偏离电极的间隔区域，因为它是非导体。

过程描述。在碱性炉衬的EAF里的炼钢过程可以分为：①熔化期；②氧化期；③成分和温度调整期；④出钢期。

炉料装载完毕，电极下降到离炉料上面大约1in的位置时电弧得以击穿。在熔化阶段，电力和电极的消耗是最高的。由于电弧的直接放电以及通过从炉膛里聚集的金属熔池所发出的辐射而使炉料熔化。当第一批废料熔化结束时，将经过燃烧或煅烧的石灰作为熔剂加入。

氧化期是从熔化金属的形成开始到全部炉料被熔化为止。在这个阶段里，磷、硅、锰、碳和铁被氧化。氧来自注入的氧气、炉中的气氛、添加合金元素的氧化物以及装载炉料中的矿石、矿渣和轧钢屑。氧化剂必须以受控的方式加入，以防止过多地生成一氧化碳致使炉渣发泡，并从炉子里溢出。称之为“碳沸腾”的一氧化碳起泡沸腾，会搅动熔融金属，使其温度和成分变得均匀。在碳沸腾的过程中，熔融金属的氢和氮的含量也会减少，因为电炉炼钢并不是自热的，而是依靠电力所提供的能量。熔融金属的温度大大高于BOF。于是如果炉渣不是强碱性的，磷就会被保留在里面。

大部分牌号的碳钢和低合金钢都是采用单渣法冶炼的。通过调节钢液的成分和温度达到所要求的数值，以此完成出钢前的冶炼。氧化期包含这个调节期，如需要的话还可在钢包里进行二次炼钢，以此进一步降低硫和氧。

用双渣法可以冶炼高质量的碳钢和合金钢，其第一次的氧化炉渣是从炉里清除出去的，而还原炉渣利用经煅烧的石灰、氟石、焦炭和砂子在熔融金属的表面形成。炉渣里生成的碳化钙有助于脱硫(见“液态金属的预处理”一节)，然而现在都首选钢包处理来降低硫的含量。也如在BOF里，通过炉渣化学处理控制其成分。一种典型的熔化炉渣(质量分数)由石灰41%、氧化铁和氧化硅分别14%、氧化镁9%、氧化铝4%及氧化亚锰13%构成，此外还有少量的氧化磷和硫。

电极提起并让炉子倾斜出钢。当钢液流入钢包时，要防止钢流被氧化。电炉的出渣是在出钢之前、其间还是之后就取决于所采用的冶炼方法。“残留钢液法”，即将少量的钢液遗留在炉子的后部是一种常用的方法，以便于下一炉的冶炼用。这有助于减少炉渣转移到钢包里去。也有将复杂的滑门装置用于防止炉渣的这种转移。

电弧炉的主要优点在于能接受任何比例的装炉物料，即废料、熔化铁液、预还原材料和球团矿的灵活性，尽管实际生产大多只严格限制废料和DRI。通过电力的控制可以很好地用于调节以不同的速度加热熔融金属，以此实现冶炼的精密控制。吹入氧气可以加速熔化冶炼的过程。EAF为普通钢或高质量特种钢的可控性生产提供了很大的选择范围。合金钢可以通过二次处理进行直接冶炼。这种工艺因为其工艺控制所固有的优点而成为适合于生产更高牌号的合金钢(如工具钢和不锈钢)的最好方法。小容量的EAF可以应用于若使用小型氧吹转炉而不够经济的一些用途。由于EAF是以废料为主，而废料中的夹杂物控制又是极为重要的，因此在其炼钢的条件下，像铜和镍这样的元素是很难去除的。

先进的炼钢技术

氧气底吹转炉工艺。它与氧气顶吹工艺或BOF的主要差别在于所需要的全部氧气都通过炉子的底部，并通过风口进入(见图2.2-7)。石灰能以细粉末状随同氧气一起吹入以加速石灰的溶解，并形成混合良好的均质炉渣。氧气底吹转炉工艺根据吹氧所设计的风口类型而通称为OBM，Q-BOP或LWS工艺。利用天然气或油屏蔽和保护风口，使其喷嘴处免遭因氧化而产生的剧热。底吹转炉工艺产生的噪声和在熔融金属中形成的涡流都比顶吹转炉小。由于底吹转炉工艺的运作更接近于平衡状态，其氧化势也远低于顶吹工艺。这种炉渣-金属平衡的控制将在FeO进入炉渣的过程中减少铁的损耗，提高锰的回收，减少炉子的

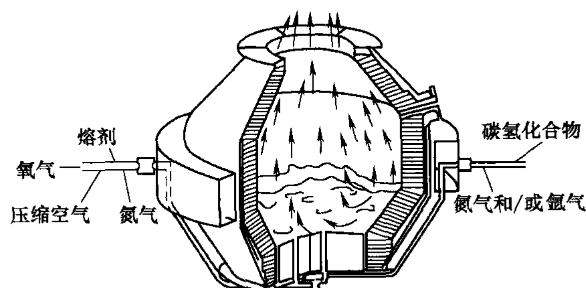


图2.2-7 典型底吹工艺的示意图

喷溅，缩短吹氧的时间，改善硫、磷的含量，以及降低所溶解的氧和氮含量。底吹转炉可提高至约2.0%的产量。由于不再存在吹管的多样性，Q-BOP的工艺控制也较为容易些。还有，底吹转炉工艺由于氧气比率比顶吹的低10%，故其废料率也更低一些。

一般说来，底吹氧气的炼钢所产生的热也更少一些，因为对于同样的碳调节含量，需要被氧化的铁和锰也要少一些。在底吹转炉里，从碳到二氧化碳的转变也较少，而且一部分的热量被保护风口的碳氢冷却剂带走。于是Q-BOP能熔化的废料比顶吹转炉要低约4%。因无需氧气吹管就能得到较好的终点控制，故底吹转炉的热化学反应再生率大为提高。由于使用了碳氢化合物，故调节钢的含氢量稍微高一些。然而底吹转炉工艺中钢的碳、硫和氮的含量及炉渣中的FeO的含量比起顶吹的都要低。由于风口附近的高热，一般底吹转炉的炉底侵蚀率偏高，其可用性也有所降低。

组合吹炼工艺。底吹转炉工艺相对于传统BOF顶吹工艺的优点和局限性导致了组合吹炼工艺的开发，其气体同时从转炉的顶部和底部吹入，如图2.2-8所示。在这个大类别里有多种样式的转炉，它们的差别只是在于从顶和底所吹的气体的种类和数量。也有一些是使用不同的风口形式，例如小的不带冷却的风口、带冷却的风口或用可渗透元件。通常从顶管吹氧气，并由底部吹惰性搅拌气体（LD-KG、LD-AB和LBE法）、惰性氧化气体（LD-OTB、LD-STB和SBC-BAP法）或氧气（LD-OB、K-BOP和OBM法）。诸如克拉珀-COIN和KMS，也都属于组合吹炼工艺，它们具有能以100%废料运行的灵活性。这些方法的特征都是通过利用后置燃烧吹管、废料预热和/或碳粉喷注，以此增加废料的熔化率。

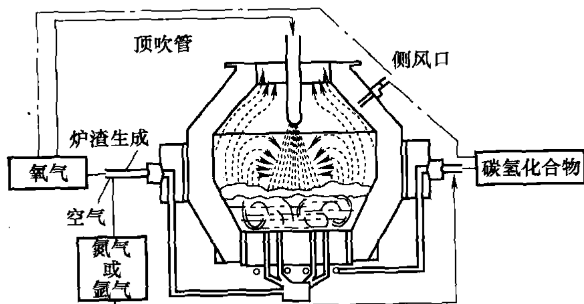


图2.2-8　典型联合吹炼工艺的示意图

利用浸没式气体喷注增强对熔融金属搅拌的工艺，可以在减少熔融金属氧化的同时提高脱碳效率。这种工艺也可以减少氧的溶解程度及熔剂的消耗而保持较高的锰含量。针对顶吹工艺的任何给定含碳量，通过在组合吹炼工艺中使用透气元件降低氧的溶解可以得到较好的合金元素回收效果，并降低钢包冶炼对脱氧剂的需要。由于组合吹炼工艺具有较好的炉料混合及接近平衡的钢冶炼才能得到较低的氧含量；该工艺也减少了铁和锰的氧化，从而使其产量可提高将近1.0%并降低了出渣率。故较低的金属氧化将降低工艺的废料使用率。应用冷却的炉底风口则有利于碳氢化合物、粉末石灰或煤的注入，以此增强冶炼效率和废料的熔化。应用炉底未经冷却的风口并以氩气进行搅拌的缺点就是氩气的成本以及对高流速氩气的阻塞效应。

工艺控制。现在已经能够根据产品结构、脱碳反应、工厂的冶炼要求和对调整措施的响应时间，实现有效的在线计算机过程控制，还可以对脱碳率、含碳量和熔融金属的温度进行连续监控。某些测量需要应用与工厂实践和所用物料质量相适应的数学模型，还要严密符合计算机的运算规则。在线过程控制可以实现对碳、硫和磷的含量和出钢温度控制的改进，减少炉次的熔炼时间，增加废料率和热量，减少熔剂、冷却剂及氧的消耗量，以致从整体上提高钢的质量。对于终点含碳量和温度的精确控制可以避免昂贵的重复吹炼和冷却工序，以及为此所花费的时间。

静态装炉模型规定了合适的装炉物料组合——液态金属、废料、熔剂和氧气——以满足其对终点成分和温度的要求。事先完成部分计算，然后在实际物料达到平衡时，再进行校正性计算。为了达到规定的熔炼终点需确定重复吹炼和冷却的要求，故在炉次的熔炼过程当中还要进行一些计算。采用吹炼过程测量的动态工序是为了将其用于与静态装炉模型相结合，以便对100%炉次熔炼的精密控制。在线测量碳和温度的水冷浸没式吹管系统、连续不断进行含碳量的外逸气体分析和利用声音强度对含碳量的声学分析，都是工业生产中的一些实用性技术。浸没式热电偶通常都用于直接测量温度。

钢铁冶炼中的耐火材料

钢铁工业中将耐火材料作为内衬，用于炼铁和炼钢的如高炉、BOF、EAF等以及储存、转移金属和炉渣的钢包和流槽的基础材料。因此耐火材料往往要求能承受超过1700℃（3090℉）的温度。耐火材料在钢铁的冶炼中影响产品的质量和能量的消耗。耐火材料还要在其使用寿命和成本的基础上进行选择。

碱性耐火材料。碱性炼钢工艺中最重要的一类耐火材料为镁基材料，包括天然或人造的镁砂、水镁石和白云石。致密的人造氧化镁是用海水制造的，其纯

度(质量分数)为95%至99%的MgO。天然镁砂是以氢氧化物或碳酸盐的形式而存在的。白云石的双联碳酸盐($CaCO_3 \cdot MgCO_3$)在自然界大量存在。凡是要生产含夹杂物最少的致密材料都要求进行高温煅烧(在窑里燃烧使碳酸盐熔化)。铬镁耐火尖晶石一般也与氧化镁结合使用而不会被点燃。

酸性耐火材料。归类于“酸”类材料的硅酸盐耐火材料都是从石英砂、砂石或锆英石一类的原材料中精选得到的。利用电熔可以生产专用的经熔化的氧化硅或经稳定化处理的二氧化锆的耐火材料。还有几种耐火粘土、硅酸铝水合物和高岭土耐火砖也都常用于低温耐火的用途。耐火粘土所具有的塑性，使其能作为密封剂和砂浆使用。

其他耐火材料。高铝耐火砖，如高铝硅酸盐或纯烧结氧化铝都常被作为高温耐火材料应用。由石油焦炭、铸造焦炭和无烟煤制成的碳砖和坯块广泛用于炉膛的衬壁。由焦炭和硅石的混合物经高温焙烧制成的碳化硅和氮化硅耐火材料常被单独以及与其他耐火材料结合使用。

一般来说，作为耐火材料要求能经受较大范围的温度和温度的突然变化，以适应急热急冷性，还要求具有耐熔化金属、炉渣，及工艺和烟道废气对其产生的小压缩应力、冲刷力及腐蚀作用。此外，还要求耐火材料根据需要具有绝缘、吸热或导热的功能。用于炼钢炼铁的耐火材料的化学、物理特性，以及对于各种不同反应炉衬壁材料的选用，另有专述(参考文献[22])。

炼铁和炼钢用熔剂

炼铁和炼钢用熔剂有两方面的作用：①使高熔点的难熔氧化物夹杂物或矿渣变得可以熔解，并能从熔化金属中分离出来。②提供一种能优先与夹杂物元素或其化合物而不是金属相结合的介质。实际上，所有进入熔炉或冶炼炉形成炉渣的化合物，都能按碱性或酸性进行分类。二氧化硅是惟一被严格作为酸性熔剂使用的物质，尽管三氧化二磷在炉渣中表现出为强酸性的性状。为了达到更好的反应动力学条件和炉渣处置，有时候加入中性熔剂以改善其流动性或降低炉渣的熔点。矿石同时含有酸性和碱性的氧化物夹杂物，但以酸性组分为主。两性氧化物如氧化铝和二氧化钛有着酸或碱的性质，主要取决于炉渣的状态。在酸性炼钢工艺里，二氧化硅常从炉衬本身析出。而在碱性工艺如BOF和EAF中，当系统出现石灰过量或二氧化硅不足时，应当添加二氧化硅。

主要的碱性熔剂为石灰石($CaCO_3$)或白云石($(Ca,Mg)CO_3$)，不论哪一种或两种一起，都可以作为高炉的熔剂使用，这取决于炉渣中存在的其他组分和所要求的炉渣去硫能力。石灰石适用于大量去硫。碱性氧气炼钢工艺使用经燃烧或煅烧的石灰或经燃烧的白云石来熔化二氧化硅，而二氧化硅是由硅的氧化而生成的。炉渣里存在的氧化镁有助于保护用镁砖砌成的炉衬。石灰石和白云石需要事先在炼钢炉外进行煅烧或燃烧，因为这些化合物的分解都是吸热的，故不希望在自热的过程中另外增加热量。经燃烧的石灰含有>95%(质量分数)的CaO，经煅烧的白云石是由>57% CaO和>40% MgO(质量分数)构成的。含有>50% CaF_2(质量分数)的氟石或氟化钙在炼钢中作为更为有效的脱硫剂使用。在钢铁的冶炼中，熔剂的质量和数量是很重要的，因为它在反应炉里占据了有用的容积而影响生产率。

钢的二次冶炼

钢包冶炼

进行二次炼钢或钢包冶炼是为了生产纯净钢。纯净钢就是要满足对于表面、内部及显微纯净度的质量和对力学性能的严格要求。如前所述，钢包冶炼就是在转炉或EAF的初次提炼之后的第二步冶炼。由于对钢的成分要求日益严格，钢包冶炼业已成为炼钢中的常规部分。钢包冶炼用于脱氧、脱碳和调整包括气体在内的化学成分，通常通过有效的二次炼钢工艺缩短炉内的提炼时间，从而提高生产效率。钢包冶炼还能控制浇铸温度，对于连续浇铸尤其需要。以此能生产出含量(质量分数)低至0.002% S的钢，且不含氧化物和硫化物的夹杂物。在钢包里，还可以控制夹杂物的形状，从而使力学性能得到改善。

脱氧作用和合金化。为进行适当的钢包冶炼，要求钢液满足一定的温度和化学性质要求。当钢液出的差不多时，会有一些炉渣排入钢包。脱氧和合金的添加就是在出钢的过程中进行。出钢时，下落到钢包的金属熔流会引起熔融金属的强烈搅拌作用，这有助于合金的熔解、脱氧和均质化。加入的脱氧元素如铝和硅的消耗取决于排入钢包的炉渣数量和成分(参考文献[23])。因为这些脱氧元素很昂贵，所以应尽量降低其消耗，而且脱氧生成物的滞留还会对钢的纯净带来不利影响。通常，脱氧剂(如铝)会部分地被炉渣和吸入的空气所氧化。铝在钢中溶解也取决于所处的平衡条件。作为脱氧剂的铝的主要作用就是与溶解的氧发生反应，成为氧化铝浮在上面。然而也有一些更细的氧化铝颗粒成为夹杂物残留在钢中。为冶炼低夹

杂钢，需通过进一步的处理使细氧化物颗粒漂浮起来。炉渣的排入钢包应降低到最低限度，以此控制被吸入钢里的氢和氮以及因 P_2O_5 被脱氧剂还原而发生的磷反复转变。为此，已有多种装置可以用于阻挡炉渣进入钢包。

氩气冲洗和真空处理。利用氩气搅动处理，即为人熟知的在线氩气冲洗使熔融金属均质化，并且通过降低一氧化碳分压促进脱碳的进行。氩气冲洗还有助于降低氮、氢的含量，并由于搅动效应而增强合金的溶解和炉渣-金属反应。在出钢的过程中或过程前，可以进行与合成(低 FeO)炉渣或调整(高 CaO)炉渣的交换处理，此后进行氩气冲洗，以促进脱氧、脱硫和夹杂物的改善。氩气冲洗方法的示意图如图 2.2-9 所示。虽然在图 2.2-9 中示出的是一种用于浇注进入钢包的注塞杆结构方案，但目前应用更为普遍的还是移门系统。

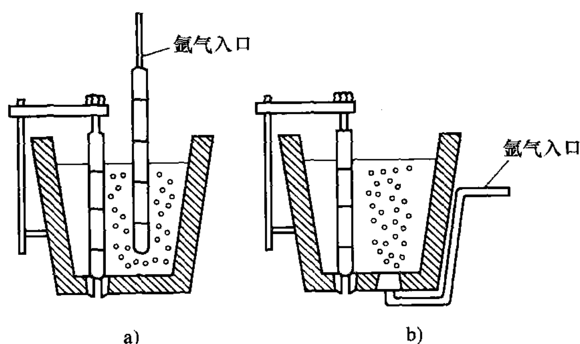


图 2.2-9　用于氩气搅拌工艺的方法示意图

a) 吹管法　b) 多孔塞法(原文如此,似应为“(a)疏松堵塞法(b)吹管法”——译者注)

真空处理有利于脱气并增强脱氧和脱碳的动力学条件。合金的添加对氧化很敏感，因此，应在脱氧之后加入(例如加入铁-铌)，也可在真空处理的过程中进行添加。确保昂贵合金的完全溶解可改善对其的利用。在实际生产中还可在钢包里进行惰性气体、惰性气体和氧气的混合气体或纯氧气的喷注处理。以惰性气体为载体，将 CaSi、CaC_2、CaAl、稀土和镁粉剂注入，或插入预先经过合成炉渣浸涂处理的金属丝，以此同步进行脱氧、脱硫和硫化物形态控制。如果要生产超低碳含量牌号的钢，通常并不在出钢的时候进行脱氧，因为后面还需要溶解氧与碳反应。

为进行有效的二次冶炼，必须精确地掌握钢包中钢液的温度、化学成分和容量。在处置钢液的设施里使用优质耐火材料，将有利于当钢包或流槽里有钢液存在时降低其氧的活动性。钢包的预热和温度控制也是二次炼钢的一个整体组成部分，因为钢包实际上起着散热器的作用。

合成炉渣。当钢在碱性、无氧化性炉渣里进行处理时，钢包的精炼既能生产出超纯净的钢，又能进行有效的脱硫处理。这种合成炉渣具有低氧势、低熔点以及氧化铝和硫在其里面的高溶解度。

过程与目标

二次炼钢工艺为钢液的处理规定了一些应当达到的目标。表 2.2-2 列出了一些用于钢包处理的主要方法和设备及其相对能力。这些方法可以分为四种(见图 2.2-10)：搅拌法、注入法、真空法和加热法(参考文献[26]、[27])。

表 2.2-2　二次炼钢工艺的相对效率

炼钢工艺	冶炼特性							
	成分控制	温度控制	脱氧(O_2)	脱氢(H_2)	脱碳	脱硫	显微纯净	夹杂物形貌
液流脱气	1	0	1	3	1	0	1	0
D-H 脱气	2	2	2	2	2	0	2	1
R-H 脱气	2	2	2	2	2	0	2	1
RH-OB 脱气	2	2	2	2	3	0	2	1
钢包精炼炉，仅再加热	3	3	3	0	0	1	3	0
钢包精炼炉，再加热并真空脱气	3	3	3	2	2	3	3	1
氩-氧脱碳	1	2	2	1	3	2	1	1
氩气发泡，CAS	2	1	1	0	0	0	1	0
氩气发泡，CAB	2	1	2	0	0	2	2	2
喷管粉末注入	1	0	2	0	0	3	2	3
金属丝涂裹注入	2	0	2	0	0	1	2	3
RE 罐	1	0	1	0	0	1	1	3

D-H，Dortmund-Horder-Huttennunion；R-H，Ruhrstahl-Heraeus；CAS，以密封氩气发泡调节成分；CAB，加盖氩气发泡；RE，稀土金属。

注：0，无；1，好；2，更好；3，最好。

搅拌法就是简单地利用惰性氩气通过多孔塞或浸没式吹管来清洗或冲洗钢液(见图 2.2-9)，以此使熔融金属均质化和氧气逸出。如果使用合成炉渣，借助于强化炉渣-金属反应的脱氧和脱硫作用也可以通过氩气冲洗来实现。合金添加剂或脱氧反应剂可以粉末形态存在，并以气体为载体，通过浸没式吹管注入熔炼，或通过将其材料涂裹于金属丝外面再注入熔炼。真空处理过程就是用于降低周围气氛中的氢气、氮气和一氧化碳分压，以利脱气、脱碳和脱氧。真空处理可以分为真空钢流脱气、钢包脱气和再循环脱气三大

类（表2.2-2和图2.2-10）。在二次处理中温度的损失可通过在初始炼钢中使用较高的过热或者增加一次再加热过程，如装有浸没式电极的钢包炉进行补偿。真空感应熔化或真空氧气脱气是其他加热工艺的例子。还有一些重要的工艺将在本节后面和“特种钢的冶炼”一节中详细论述。

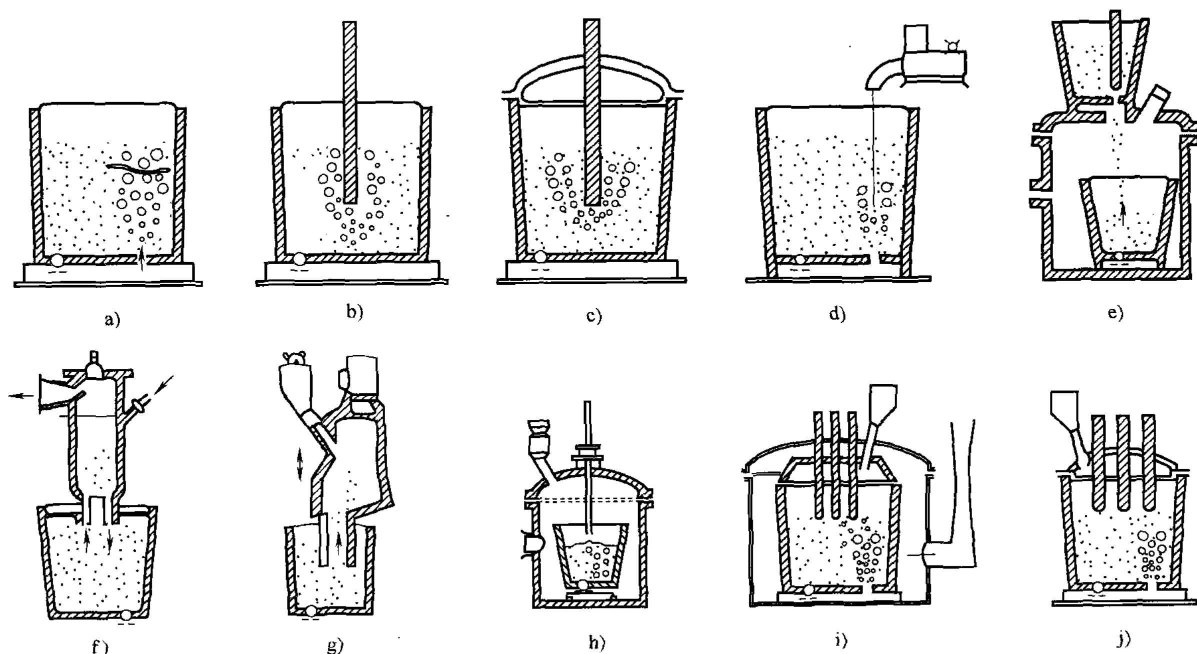
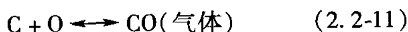


图2.2-10 二次炼钢工艺

搅拌工艺：a）底部吹入 b）吹管吹入加入工艺 c）粉末喷入 d）金属丝插入 真空工艺 e）液流脱气 f）R-H脱气 g）D-H脱气 加热工艺 h）VOD工艺 i）VAD工艺 j）钢包炉工艺

处理

脱气处理。钢液会从大气和炼钢所用的材料中吸收气体并当其凝固时在钢中造成脆化、气孔和夹杂物等。需要去除的气体主要为氧气、氢气和氮气。氧气是炼钢中的主要提炼剂，在决定钢的最终成分和性质中发挥其作用，还要影响到脱氧剂的消耗。各种镇静、半镇静和沸腾钢的生产主要指在其凝固前对钢液中氧气的控制。如果在真空脱气中熔化的钢液中有足够高的氧含量，氧气就会与一部分碳反应生成一氧化碳。离析出来的一氧化碳被形成的真空去除，即所谓的真空碳脱氧。在给定的温度和压力条件下，未脱氧钢中的碳和氧含量按照下式接近平衡。



$$C + O \longleftrightarrow CO(\text{气体}) \tag{2.2-11}$$

$$K^{eq}_{1600℃} = \frac{p_{CO}(\text{atm})}{w(C)w(O)} \tag{2.2-12}$$

式中，K^{eq}为热力学平衡常数，p_{CO}为CO的分压。

图2.2-11所示是在1600℃（2910℉）达到平衡时，作为一氧化碳分压函数的碳和氧含量。由于真空处理的压力降低而导致越来越多的碳与氧发生反应，以此

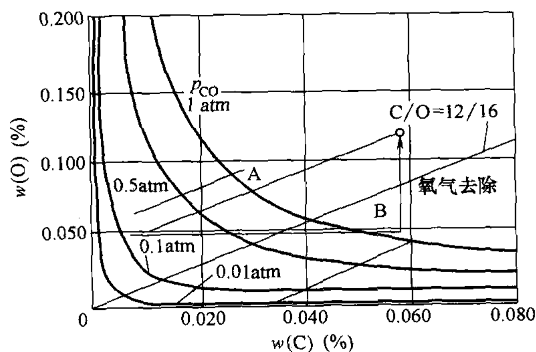


图2.2-11 温度为1600℃（2910℉）**、钢液液面上的不同CO气体，分压的钢液的碳氧平衡关系**。如果在真空处理的开始（A区），碳和氧的含量（质量分数）分别为0.04%和0.05%，那么足够的氧就可以在p_{CO}为0.01atm下把$w(C)$降低到0.01%。然而，对于$w(C)$大于0.05%（B区）的钢液，如果在p_{CO}为0.01atm下，钢要求$w(C)$为0.01%，那么在真空处理前需另加入氧气使其含量提高到含氧区。注意：A区和B区分别在CO气体的化学计算线的上面和下面

建立起新的一氧化碳分压，从而使氧无法与加入的脱氧剂生成夹杂物。在大气压力下，强脱氧剂如铝、钛和硅与氧的亲和力比碳大，它们都能与氧气发生反应（见图2.2-12）；因此用真空脱气时，碳并不能与氧发生反应。如果脱氧剂的氧化物无法顺利地浮出，则它们在钢凝固时就会形成夹杂物。在低于0.01atm的压力下，碳是一种比铝、钛或硅更强的脱氧剂。

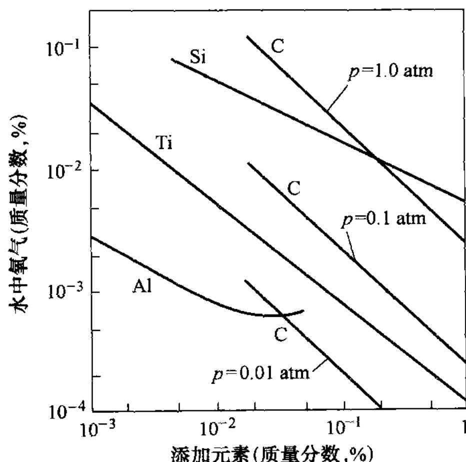


图2.2-12　钢液中氧的总含量与各种脱氧元素之间的平衡关系

氢气会造成有缺陷的钢锭，如脆化、低塑性、热剥落和气孔。氢气通常从炉料和环境中的水分里析出，按照希佛特（Sievert）定律：

$$[\%H]=K(p_{H2})^{1/2} \qquad (2.2\text{-}13)$$

溶解于钢液中的氢气的量[%H]与钢液上面的氢气分压 p_{H2} 有关。平衡常数 K 在温度为1600℃(2910℉)时等于0.0027。在真空脱气过程中，影响氢气去除的因素为：暴露在真空中的表面积、脱气压力、钢的成分、前期脱氧的程度以及从合金添加剂、炉渣和耐火材料中析出的氢气。

氮气对用于拉拔的低碳钢特别有害，应当尽可能地降低其含量。尽管氮气也遵循希佛特定律，但是氮具有生成稳定氮化物的可能性，故要通过氩气冲洗或真空脱气将其去除是不容易的。所以在炼钢过程中，应努力对氮进行初始控制。

脱碳处理。以传统的炼钢方法生产 $w(C)<0.03\%$ 的钢是很困难的。但只要放在真空里，就可以将 $w(C)$ 从0.04%~0.06%降至0.01%，如图2.2-11所示。不过要特别注意的是，钢在脱碳之后在合金添加过程中的含碳量。

脱硫处理。前面已经提到过，初始炼钢的除硫能力是非常有限的，因为存在着很强的氧化条件。然而在钢包工艺中确实可以通过选择合适的反应剂而取得特别的脱硫效果。

由于氧气不利于硫的去除，所以应先行脱氧，将氧含量降至最低水平，并最好用铝脱氧。通常脱氧和脱硫也是同时进行的。由于在除硫过程中的氧化物是不稳定的，故钢液中夹带的氧化炉渣将会降低脱硫效率。此外FeO也会降低脱硫的效率。钢包内衬的氧化物同样会影响硫的去除效率。因为脱硫包含炉渣-金属间的反应，所以钢液与脱硫剂的密切混合是除硫的先决条件。除了上述要求之外，按照质量作用定律硫的初始和终了含量是很重要的。因此，$w(S)$ 低于0.006%的钢是很难炼成的。

二次炼钢设备

二次炼钢通常都是在钢包、熔锅或专用炼炉里进行精炼，这种精炼在初始反应器里是无法进行的。先将初始反应器里的钢液全部注入一个出钢钢包，然后再将其转移到其他钢包、熔炉或熔锅里进行处理。或者，钢液在倒入铸模前直接在出钢钢包里进行处理。

真空脱气工艺。就是将液态钢暴露在低压的环境中以此降低钢里的气体，特别是氢气和氧气含量。这个方法的有效性直接与所熔化金属的暴露面积相关。如前所述，氢气的去除取决于其分压和扩散，而氧气的去除主要有赖于碳、氧的化学反应和一氧化碳气体的分压。在此过程中，同时进行温度和成分的控制与脱碳处理、显微纯净化及夹杂物形态的控制。真空脱气主要采用三种方法来实现：①钢液液流脱气；②循环脱气；③钢包里的真空脱气。

因为在脱气过程中，会由于钢包或真空容器的辐射和吸收而造成热量的损耗，又由于其损耗因工艺不同而异，所以必须通过调节出钢温度来补偿温度损失。在真空处理过程中，保温的方法有：让炉渣层保留在钢液表面、利用防辐射罩、容器的预热和补充加热装置，以及优化处理时间。大部分的现代脱气系统里，真空都是由串联安置的多个蒸汽注射器创建的，用以发挥多级泵压的效能。若以同样的速率处理，对于在部分脱碳条件下的低碳钢脱氧要比高碳钢脱氧需使用更多的泵级数量。一种再加热型的真空感应熔化工艺使用的泵级多达六级，而重复循环型R-H或D-H脱气装置则使用五级。然而，一般用于其他真空脱气系统里的是一种四级蒸汽注射器。进而，真空脱气工艺还可以在减压条件下把脱氧剂和合金加入钢液。这种加入将有利于系统处置热量和混合物料能力的提高。

钢液液流脱气。这些方法包括钢包到钢包法、钢

包到铸型法和出钢脱气法三种。钢包到钢包法可实现去除氢气，并且借助碳脱氧去除氧气。一个经预热的浇铸钢包上装有一个滑门机构或浇注系统，在其容器罐的内部装有一挡杆装置，而容器的开口处盖着一铝盘。该罐被抽成0.1Torr的真空，将盛有过热并经部分脱氧的钢液的出钢包置于真空罐的顶部。从出钢包里流出的钢液将铝盘盖熔化并就此流进浇铸钢包里，而其余脱氧剂则从加料斗在真空中投入。脱气过程中压力稳定在接近0.8Torr。脱气之后，充入氮气使系统恢复到大气压。

在钢包到铸型法的脱气过程里，将钢锭铸型置于地面上，配上热顶盖，用燃烧器预热。真空罐也放在附近地面上并使真空紧闭密封。罐内放置一个装有挡杆装置或浇注系统的中转或“小型”钢包，并使其与钢锭铸型对齐。罐顶开口配合安装一个经预热的耐熔颈套，钢液液流通过它从小型钢包的浇注系统直接倒入钢锭铸型。真空罐抽成0.10~0.20Torr的真空，盛有过热钢液的出钢包置于小钢包的上方，以便钢液从其底部倒出。一旦小钢包装满到2/3时，钢液液流经由颈套流入罐里，当液流一进入真空的容器里，就粉碎成细微的液滴，并形成非常大的表面积，以此增强其脱气进程。以这种方法用若干炉次的出钢真空铸造成为大型钢锭，最后让氮气或空气充入罐内用以消除真空。

出钢脱气法由下列部件组成：一个在顶部有法兰和在底部浇注系统的开口处有O形密封板的专用钢包、一个钢包盖，以及一个用浇口塞塞紧的中间包，该中间包正对专用钢包浇注系统下面有一个密封铝盘。浇注系统是密封的，而专用钢包是用盖子盖着的。一个合金加料斗通过钢包盖插入钢包。经预热的、被浇口塞塞紧的中间包被放置在钢包盖的上面，而整个装置可以确保从炼钢炉流出来的钢液流入中间包。专用钢包被抽成0.2~0.5Torr的真空，当中间包被炉子里出来的过热钢液注满时，将浇口塞拔起。在脱气的过程中，把所需的脱氧剂通过料斗加入。脱气后钢包恢复到大气压，再按照“铸造”一节所介绍的常规方法进行浇铸。

循环脱气。该方法利用大气压力将钢液从钢包压入真空容器里，钢液在里面经受低压处理，然后再流回钢包。金属重复以上循环40~50次才能完成脱气，而真空则起重复循环和脱气的作用。在使用耐火材料衬里的真空罐装里安装一根“通气”管、一根石墨电阻加热杆、一个合金加料斗、一套升降真空罐或钢包的机构以及一个气流喷射系统，由此形成D-H脱气法(见图2.2-10g)。将真空罐内预热到规定的温度，将合金添加剂装入料斗。让未经氧化或部分氧化的过热钢液出钢流入一个钢包里，并使其处于真空罐的下面。无论钢包或真空罐都可以垂直移动。通气管插没在钢液里，将真空罐抽成真空，以使钢液被吸入罐里。一旦钢液开始脱气，就将通气管升起使部分钢液流回钢包。这时气体被吸出罐外。通过几个这样的操作过程可将钢液脱气到所要求的程度，随后在真空罐恢复到大气压以前添加合金。有些通气管设计成使流经的钢液能在氩气或氧气中暴露。

在R-H工艺中，采用双管脚或双通气管，其中一个管脚中安装了一根进气管(见图2.2-10f)。将经预热的、与D-H脱气装置相似的真空罐下降到盛有过热钢液的钢包里，并使其双管脚浸没入钢液至将近150mm(6in)的位置上。将真空罐抽成真空，并通过进气管充入惰性气体，因气液混合物的密度较低而造成钢液的升高，并流入真空罐里。金属经过脱氧后，在重力的作用下通过另一管脚流回到钢包里。在0.3~0.6Torr的压力下，经过如此过程的若干个循环将钢液脱气到要求的程度，此后再行常规浇铸。作为R-H工艺的一种变形，即所谓的RH-OB主要用于去除钢中的氢和碳。R-H和RH-OB之间的差别在于脱气过程中注射进去所用的气体。RH-OB工艺除了惰性气体外，也注入氧气以增强脱碳作用。惰性气体还有助于对熔融物料的搅拌。

真空钢包的脱气。该工艺包括感应搅拌和真空-氧气脱碳(VOD)。在感应搅拌的过程中，感应线圈用于在钢液里产生感应涡流，以此起到搅拌的效果。盛钢液的钢包外壳部分采用非磁性的奥氏体不锈钢制成，并以高矾土或碱性耐火材料作为其内衬。过热、完全去渣和未经脱氧的钢液以比其他真空脱气工艺更高的温度出钢。钢包放置在感应线圈内，而感应线圈又安装在真空罐里面，真空罐上面有防热辐射和飞溅的防护罩。真空罐慢慢地被抽到0.1Torr的真空。脱气时，激发感应线圈对钢液进行搅拌。通过料斗向脱气的底部投入主要为硅铁、铝和碳的合金添加剂，连续地搅拌几分钟使合金混合。当真空罐恢复到大气压后，用合成炉渣覆盖于钢液的表面，以此保温并防止再次被氧化。

VOD法用于生产不锈钢。不锈钢的熔炼使用铬铁合金、不锈钢废料、硅铁、经煅烧的石灰和氟石配制炉料，并使其熔化，然后加热到出钢的温度。不锈钢利用过热的、碱性衬壁的钢包出钢，钢包上装有多孔塞用于吹进氩气。钢包置于真空的容器内并抽成低压，而氧气被吹入处于钢液的上方，氩气则由包底的多孔塞进入形成气泡(见图2.2-10h)。吹氧期过后，

再通过一段真空时间作进一步的脱碳和脱氧。如必要，还可在此真空期里加入脱氧剂。经过真空处理后，给炉里加入脱硫炉渣，使之除去高达50%的初始含硫量。包底吹氩也可用感应搅拌代替。

喷射冶炼。以涂裹金属丝或气体为载体，将粉状反应剂加入钢液，其主要目的在于脱硫、脱氧、合金溶解和夹杂物形状控制。用于工业上的粉末种类繁多，经过机械混合或预熔化后使其颗粒化。硅化钙处理是用于同步进行硫和夹杂物形状控制的最为普遍的方法。石灰、氧化铝和氟石混合物料的加入也是为了生成合成炉渣。一般借助喷射实现合金加入的铁合金包括Fe-Si、$CaCN_2$、石墨、NiO、MoO_2、铅、碲以及Fe-B、Fe-Ti、Fe-Zr、Fe-W等。已有多种通过吹管喷射粉末和插入涂裹金属丝的方法在工业上得到应用。

当粉末用钢液中的吹管喷射进入时，其颗粒被作为载体的高速气体加速并进入气流。例如，在含气粉末喷射过程中，0.6~1.0mm(0.02~0.04in)大小的Ca-Si颗粒借助于浸没式吹管在5~15atm的压力下喷入。在吹管的嘴尖处，由于压力的降低和温度的升高使气体雾化扩散。在大部分的炼钢应用中，其喷射过程往往都是一种气锥形的喷洒。这些颗粒一旦离开喷嘴，就由于其很高的动量而沿直线向下运动，直至喷射的气流破碎变为一大堆上升的气泡。大部分的粉末颗粒为上升的气泡所席卷。如果粉末颗粒被钢液润湿，它们就会从气泡中游离出来，并且在熔融金属中巡回，从而在接近上表面形成一种炉渣-金属-气体乳胶体的物质。金属丝可以从钢包的底部插入，从而能获得更好的合金收益率。喷射冶炼也可用于脱氧剂，如铝的加入，如采用吹管喷射和铝丝的方式插入。用于粉末喷射法的装备初始投资远大于金属丝插入法，但是涂裹金属丝比普通的金属或粉末要昂贵得多。图2.2-10c和2.2-10d所示的是注射工艺的示意图。

硫和磷控制

前面曾经强调过，在炼铁过程中由于高炉里的还原条件占优势而使其硫的初步去除受到影响。然而在炼钢的过程中，在喷气搅动区里，因气体-金属界面上的直接氧化作用而导致15%~25%溶解硫直接氧化成为气相，这是该搅动区里存在着的湍流和氧化的条件所致。利用根据运行数据得到的回归方程，可以估算出结果足以接受的最终含硫量(参考文献[28])。

$$(\%S)/[S]=1.42B-0.13(\%FeO)+0.89 \tag{2.2-14}$$

式中，B是按照炉渣中碱性对酸性成分质量百分比所定义的碱度值，例如$(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$；(%FeO)和(%S)分别为FeO和硫在炉渣中的浓度；[S]为金属中硫的浓度。脱硫和夹杂物的形貌控制是通过二次炼钢中的喷射冶炼来完成的。从根本上说，粉状反应剂，如Ca-Si、CaC_2、镁、$CaO+CaF_2$或$CaO+Al_2O_3$，都是用涂裹金属丝或气体载体的方法加入钢液。在粉末随气体载体的喷射过程中，脱硫作用就是用一种反应器的模型解释的(参考文献[29])。

如果在钢包冶炼中使用的合成炉渣具有高硫化能力，则可以使除硫达到10ppm($\times10^{-6}$)硫的超低水平。由于炉渣中氧化铝的活性很低，故脱氧的生成物氧化铝会被吸附在炉渣的表面上。铝酸钙型的合成炉渣(通常为$50CaO:7SiO_2:43Al_2O_3$)还能脱氧和降低钢中的总含氧量，并同时进行脱硫。已有多个经验公式可用于表述炉渣成分同硫化率之间的关系(参考文献[30])。炉渣的熔化和混合跟成分一样的重要。一般都要使用经预熔的炉渣。作为合适的脱氧和脱硫，有必要对金属-炉渣的乳化熔液进行强烈的氩气搅拌。在实际生产中，也常通过炉渣表面的加热来防止在炉渣层里产生热梯度。另外，也有使用经焙烧的石灰、赤铁矿和铝粉的发热混合物，再用氩气进行强烈的搅拌以利于把铁里的$w(S)$降低到0.003%以下。

磷在炉渣和金属之间的分配对于炼钢的工艺条件是非常敏感的。以下经验关系式常用于定义磷的分配系数k_{ps}(参考文献[31]、[32])：

$$k_{ps}=((\%P_2O_5)\times(1+(\%SiO_2))/[\%P] =f((\%FeO),B) \tag{2.2-15}$$

式中，B为炉渣的碱度；($\%P_2O_5$)、($\%SiO_2$)和(%FeO)分别为炉渣中的氧化物含量；[%P]为金属中磷的含量；f为B和FeO的函数；k_{ps}为$B>2.5$时的独立碱度。磷的分布还与调节碳的含量有关。一般来说，高碱度和低温有利于脱磷。而熔剂的加入，如钛铁矿、氟石、石灰等可降低炉渣的粘度，还有助于降低金属中磷的含量。通过在炼钢的初始阶段，对吹炼过程和液态金属中的含硅量作适当的调节可将磷主要收集在炉渣里(参考文献[33])。于是，在二次炼钢中磷的控制也就是对通过使用合成炉渣而发生的磷逆转的控制，而这种逆转又取决于炉渣中P_2O_5的活性和金属中铝和硅的含量。帕林工艺(Perrin process)的开发就是为了利用适当的合成炉渣进行钢包脱磷。如果要以铝或硅进行合成炉渣辅助脱氧，那么实行无渣出钢是很重要的。已有文献(参考文献[34])提出在氩气搅拌罐或在R-H脱气工艺中利用铝进行脱氧的动力学。

夹杂物形状控制

如果在钢中必须保留非金属夹杂物，则应当通过改变其形状和/或成分使它们不会对所要求的钢性能造成不利的影响。经过钙化合物或稀土金属的处理，可将窄长形的硫化物转变成球形硫化物，使钢变得更为各向同性化，如前面所介绍的钢包喷射技术适合采用钟罩法加入稀土。钙处理主要用于硫的控制，它也有改善夹杂物形貌的作用。当 $w(S)$ 低于 0.07% 时，硫化锰Ⅱ型夹杂物(见图 2.2-13)可得到充分改善。在实际中，每一吨钢中保留 0.5～0.7kg 的硫，因此对于夹杂物形状的控制还是必要的(参考文献[24])。这些反应剂可通过金属丝或粉末喷射加入。然而，作为金属丝插入钙的收益率是粉末喷射的 3～6 倍。稀土金属对于形貌控制(窄条形变为球形)是非常有效的，尽管它们对脱硫的作用很小。稀土金属通常需伴随镁一起加入，以便满足在整个加热过程中为使 RE 均匀分布而进行搅拌的需要。

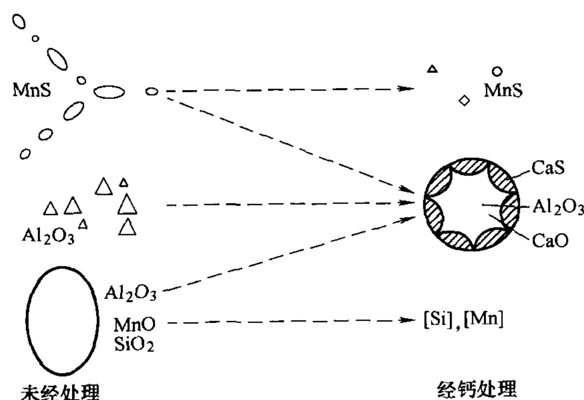


图 2.2-13　通过钙处理改善杂质的示意图

残余元素对钢性能的影响

钢里面特定元素的去除或增加都要受到钢所要求性能的制约。因初次和二次炼钢过程中发生的热力学和动力学的副作用而在钢中存在的大部分残余固态和气态元素，如硫、磷、氧、氮和氢，都是不希望有的，而且会对钢的质量和性能产生明显影响。除了特别牌号的钢，都希望降低这些元素的含量。其他元素(如碳、硅和锰)可以控制(即降低或提高)到所要求的水平上。还有一些合金添加，如铬、镍、钛、铜等是由炼钢时用的废料带进来的残留物，或者是为炼制特种合金钢特意加入的。下面将简单阐述这些元素的功效。

碳。它在钢中无论是作为间隙式溶解于铁里，还是碳化物析出，都是为了在一定的热处理条件下控制其显微组织的主要元素。对于钢来说，碳是最为经济的强化元素，并且也是一直这么应用的。不像软钢里的任何其他元素，它能够提高硬度却不会因此增加多少脆性。碳会使钢的耐冲击性下降。然而在进行电弧焊时，为了避免在其热影响区产生脆性，有必要将含碳量保持在某最大值之下。为了在所要求的淬硬性和焊接性之间进行决定性的折中，常需要对钢的含碳量做出抉择。除了含碳量以外，还有其他途径可以控制这两种性能参数。

硫。它会通过“热脆性”影响钢的轧制质量，即在轧制的过程中产生裂纹并撕裂，还会降低其焊接性。硫的这种负面影响会随着含铜量的增加和浇铸温度的提高而增大，也会随着含锰量的增加而减小。由于能断屑且不使切屑卷曲，故硫对钢的切削性是有益的。硫在钢中大多作为长条形硫化物的夹杂物而存在，因此将降低其各向同性。

磷。“冷脆性”或冷态条件下的脆性是由高含磷量所引起的，这还会在铸造时增加初始偏析的可能性，对于高含碳量这种效应还会更强。磷在一定程度上能够提高钢的强度，尽管由于其他方面的负面影响而不这么利用。与硫一样磷也有助于提高钢的易切削性。为人熟知，磷在薄钢板轧制中能防止发生粘结。如与铜配合使用，磷可改善钢在空气中的耐腐蚀性。

硅。高含硅量可提高钢的磁导率和增加其电阻。它还能提高钢锭和其他一些铸件的致密性，因为它能阻止气泡和气孔的形成。硅被发现能减缓铁素体的侵蚀速度。硅有助于提高钢在大气中的耐腐蚀性，尤其是在酸性的环境里。已经知道，硅会影响一些临界热点(相变温度)，如 Ac_1、Ac_2、Ar_1、Ar_2 等(其定义可参见铁碳相图)。一般来说，随着硅含量的增加，其塑性降低，而硬度、屈服点和抗拉强度得到提高。硅还可显著降低石墨在铁中的溶解度。

氮。氮具有相当大的强化作用，并使钢变脆。适量用于薄钢板可增加强度并保持较好的成形性。氮能促使钢的淬火时效和应变时效，从而提高其硬度、屈服强度和抗拉强度，降低塑性，并提高其缺口冲击的转变温度。高含氮量会导致动态应变时效或“蓝脆”的发生。强氮化物形成元素，如铝常用于防止应变时效。在高速钢里，氮化碳催生剂可用于提高其耐磨粒磨损性。氮气还是一种晶粒细化剂。304L 不锈钢的真空冶炼会造成氮的去除，从而使晶粒增大。这种大晶粒的粒度大小常会与薄壁管的厚度相当。

氧。氧的大量存在会使钢在锻造或轧制时发生撕裂，并使钢在骤冷时变脆。氧还生成铁、锰氧化物，

硅酸盐和铝硅酸盐一类的夹杂物，这些夹杂物若未经形状控制就会降低钢的缺口韧性。长条形的氧化铝对于轴承钢的抗接触疲劳性是非常有害的。这些长条物很有可能是在连续铸造的材料中产生的，这时铝丝是在最后脱氧阶段从铸模的上面注入材料的。如果铸模里夹杂物未经很好的去除，就会在金属内形成氧化铝的长条物。

氢。氢是作为气体溶解，或有时作为甲烷或沼气溶解而存在于钢内的。如果没有进行很好的脱氢，氢一定会产生脆化的效应，使钢丧失其塑性。通过在适中的温度里焙烧可以将氢除出，从而使其塑性得以恢复。$w(H)$超过0.005%会造成剥落，成为内裂纹或绽裂，通常都是在锻造或轧制后的冷却过程中发生的。在高碳、大截面钢件的焊接过程中，如何去除氢仍是一个问题。在残余拉应力的作用下，氢常与钢的延迟性脆性开裂有关。

锰。锰能够提高钢的强度，并改善其缺口韧性。锰的含量中超过硫化锰所需要的部分均以碳化锰或硅化锰的形式而存在。因轧制而形成的硫化锰夹杂物会引起“带状”组织。借助其能制约硫的能力，锰可提高钢的锻造性或被轧制的能力。而且由于低熔点硫化铁的存在，锰是一种能将铁转变为钢，或在热变形加工和焊接中能防止产生撕裂或热脆性的元素。锰还能提高钢的冲击强度，能在高温轧制过程中延迟晶粒的粗化。还有报道称，较高的含锰量可以提高钢的塑性，但是因此也会增大产生淬火裂纹的可能性。锰能影响钢的临界温度，还常代替碳用于提高钢的焊接性，因此锰在钢中的存在是不可或缺的。

其他元素。某些其他残余元素，诸如镍、铜、钼、铬和锡也会通过废料加进去。而在脱氧的过程中，也会造成铝、钒、钛、锆等元素的存在。有时为了得到特殊的物理化学性质，如沉淀强化、固溶强化、提高可焊接性、耐腐蚀性、切削性等，还要特意以不同的量加入这些元素。例如加入12%（质量分数）Cr可使其成为不锈钢（耐腐蚀性），而镍可用于稳定室温下的奥氏体组织，并提高300系列不锈钢的冷加工性。所有这些合金元素的效能都在本章“特种工艺路线”以及本手册中阐述各种不同类型钢的有关章节里讨论。

简而言之，镍、铬、钼、铜能提高钢的淬硬性，但也会给要求高塑性的钢，如用于深冲压用途的钢，造成一些问题。这些元素还会改变热处理的特征。镍能在很大程度上作为晶粒的细化剂和铁素体的强化剂使用，另外还能起到稳定奥氏体的作用。在低温下，镍提高钢的韧性，也就是降低从塑性到脆性的转变温度。铬一般在钢内形成碳化物，并可提高钢的弹性极限、抗拉强度和硬度，而塑性则有所降低。铬还能稳定马氏体组织，对钢的耐腐蚀性产生很强的有利影响，尽管其$w(Cr)$要求超过12%。钼可使钢锻造时，能在一个较大的温度范围里加热而不至于烧伤。钢中含有钼，还有助于提高耐冲击性和耐磨性，以及增加其韧性。

钒可增加抗冲击性、疲劳强度和耐磨粒磨损性。即使含有很少量的钒也能提高钢的抗拉强度和弹性比，而不会明显降低其塑性。通过稳定碳化物的析出，钒可防止晶粒的粗化。很少量的锡对深冲压钢也是有害的。一般来说铝是有益的，因为它能起到细化晶粒并降低对应变时效的敏感性。然而，它会促使石墨化，对于高温用途是不利的。其他脱氧剂，如微量的钛或锆一般对于钢的性能都没有什么影响。但是这些元素的某些有利的效能则要求其超过微量，因此要在二次冶炼中通过合金化来达到。例如钛、铌、锆和钒都可作为微量合金元素使用，即通过形成碳化物起到析出硬化剂的作用。

特种钢的冶炼

有一些钢，如轴承钢、耐热钢、超高强度导弹和飞机用钢和转子用钢，都有超过一般碳素钢和普通低合金钢更高的质量要求和严格的成分控制。特种钢的生产要求具有真空感应或电重熔的能力。因为超纯净度的钢生产要求较长的持续冶炼和更大的合金添加量，以及在二次冶炼中对钢进行二次加热所必要的设施。这些方法提供了以下的好处：

- 气体的含量（如氢、氮和氧）被大大地降低。
- 纯净度得到提高，即非金属夹杂物更少了。
- 由于采用钢的顺序熔化和凝固，消除由浇铸造成钢锭的心部疏松和偏析。
- 金属的热变形加工性得到改善。
- 提高了重熔钢在室温和高温下的力学性能，如塑性、耐冲击性、抗疲劳性和蠕变断裂强度。

真空感应熔炼（VIM）

钢铁工业应用油芯型和无芯型两种感应电炉（参考文献[35]）。在重熔工艺中，装载炉料的化学分析成分与其最终液态金属的基本相同。除了降低残留物质和夹杂物之外，不再进行其他重要的提炼或冶炼工作。在重熔合金钢时，要在受控的条件下加入某些易于汽化或氧化的合金元素。根据经验要进行氧化的合金元素应尽可能晚地加入，难以溶解的元素则应早一些并在强烈搅拌的阶段加入。炉衬决定于炉渣的性质

以及所要求的温度。真空熔化常作为重熔工序应用于要求非常纯净的钢上，并成为双重熔炼工艺中的第一阶段，这时从真空感应炉（如VIM）出来的钢液，再进入真空自耗电极（真空电弧重熔或VAR）炉或者电渣重熔（ESR）炉进行重熔。这些过程在本节里要予以详细的阐述。氧、氢还有一定程度的氮都能在真空熔化中去除。碳也能被降低，以便生产某些型号的不锈钢。在这些炉里使用低至5μmHg高的压力。借助于对压力和气体成分的控制，有可能利用碳或氢对液态金属进行脱氧，因为它们可产生气态的脱氧产物而防止形成非金属夹杂物。使用低压还可以去除由钢所吸取的氮。有些元素如铬、铝和锰具有的挥发性会导致其损耗，为此可以在添加过程中通过用惰性气体气氛替代真空覆盖在液态金属上面，以此将它们的损耗降至最低。

经改进的真空感应设备（如Therm-I-Vac工艺）可以作为低压下的真空感应熔化炉或金属液流脱气炉使用。该系统能够用于感应炉的冷态装料，并在低压下进行钢的熔化、提炼和浇铸。钢液还能在低压下热态装料真空炉，在里面进行金属液流的脱气，并再度加热用于补偿脱气所造成的损耗，通过调节合金元素的添加使之达到化学成分指标，并进行浇铸，所有这些都是在低压下进行。如果进行的是热态装料则钢液不要求过热。钢液在进入真空感应熔炉之前可以先行部分脱氧。这个设备大都作为真空感应单元熔化冷态炉料。

再加热真空脱气

钢包精炼炉可在二次炼钢工艺中加热，而在其熔炼中又能进行较大量的合金添加，以满足某些特种钢和不锈钢的要求。这种电炉在其提炼过程中，利用电极为其电弧再加热提供热量，从而具有脱硫、脱氧和使用合成炉渣进行冶炼生产的能力，如在“二次炼钢”一节中所述。这种冶炼炉可以进行再加热，或再加热和真空脱气。普通的加热炉能进行成分和温度的控制、脱氧，并便于进行显微纯净化。如果给炉子配备真空脱气，则还能增加钢的脱硫工序。作为一种有名的工艺改型设计，除了再加热之外还采用气体搅拌或感应搅拌。芬格尔-莫尔（Finkl-Mohr）VAD脱气系统使用的是气体搅拌，而ASEA-SKF钢包冶炼炉使用的是感应搅拌。气体搅拌是用于脱硫和包括脱气在内的其他炼钢精炼工序。其工艺除了在脱气工序之前或之后让电极从真空罐的顶盖穿过插入利用电弧加热钢液以外，都与后面“二次炼钢设备”所介绍的钢包真空脱气方法相似（见图2.2-14）。在钢包脱气工艺中利用惰性气体对钢液进行搅拌。

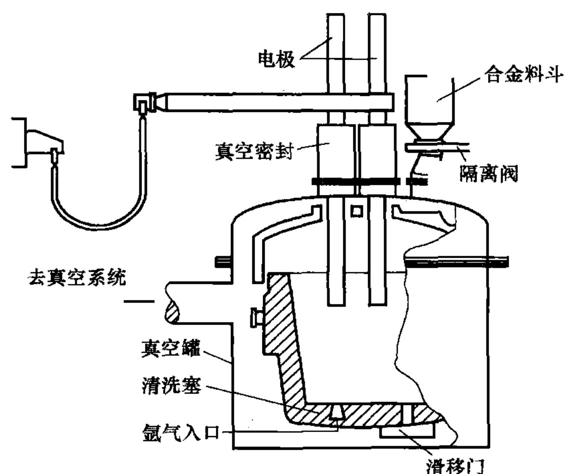


图2.2-14　用于气体搅拌、电弧再加热的设备布置图

在进行感应搅拌（ASEA-SKF工艺）时，系统由钢包炉、可移动的感应线圈、带有排气管道的真空罐顶盖、蒸汽喷头系统以及配装三根碳棒电极的炉盖所组成。炉体的外壳是用无磁性的奥氏体不锈钢制成。同样的钢包可以用于转炉里的钢液出炉，然后起到加热炉、真空罐和浇铸钢包的作用。出钢时不需要过热也不需添加任何脱氧剂。此外采用的是无渣出钢。将钢包放置在可移动的感应线圈里，并且用有三根电极的顶盖盖上。当再加热和冶炼过程开始时，激发电弧放电。加入熔剂是为了形成碱性炉渣，合金添加是为了达到其成分指标。$w(S)$可被降低到0.005%以下。热损耗可以补偿，而且真空罐也随时可供脱气。顶盖用真空炉盖替代，罐内被抽成真空。到脱气快结束时，加入铝和硅。脱气结束后将钢包移至浇铸平台进行钢锭浇注，或者把钢液倒入流槽连续浇铸（见本章“铸造”一节）。

真空电弧重熔

在真空下，自耗电极熔化或VAR是一种用于特种钢和不锈钢的冶炼工艺，这种钢先用常规的炼钢方法冶炼，然后浇铸成或锻造成电极，以便在0.1Torr非常低的压力下用于真空滴熔进入水冷铜模里。由于电弧高温和液态金属小熔池，得以生产出具有致密晶体组织、低氢和氧含量以及最少的化学和非金属偏析的优质钢锭。熔化用的是直流电。电极的直径及其与熔炉的关系是关键，而且必须与其熔化速率相匹配。高达1150kg/h（2500lb/h）的熔化速率用于生产直径大到1.5m（5ft）的钢锭。

非真空冶炼

用于特种和纯净钢生产的并且在大气压力下无需

任何补充加热的二次炼钢工艺，包括氩气吹泡工艺［例如加盖氩气吹泡(CAP)、密封氩气吹泡成分调节(CAS)］、氩-氧脱碳(AOD)、ESR和钢包喷射法(钢包喷射法将在下一节“二次炼钢设备”中介绍)。

氩气吹泡工艺。氩气吹泡——氩气搅拌、调整和冲洗——用于合金成分快速、均匀的混合，温度的等温作用，化学成分的调节以及非金属夹杂物的部分去除。这些功能都是通过从下降到离钢包底部300mm(12in)以内的一根经耐火材料保护的吹管吹入氩气，或者通过钢包底部或侧壁上的耐火多孔塞吹入氩气得以完成。氩气吹泡常常还能补充进行一些其他二次炼钢的工序：促进钢液在钢包里的整体运动，以使化学成分和热量均匀化、加强夹杂物的飘浮以及让金属-炉渣紧密混合，以利于精炼工序如脱硫和脱氧的进行。

氩气搅拌是最有效的吹泡处理，吹气以最高可达$0.3m^3/min$(10scfm)的速率通过钢液。通常出钢之后的搅拌用于将炉渣和金属混合，并有助于温度和化学物质的均匀化。高速率能破开其表面的合成炉渣层，为合金和脱氧剂的进入提供了一个开口。有时候通过搅拌促使辐射热的损耗，使出炉钢液适合于连续浇铸。由转炉带来的炉渣应当尽量减少。搅拌后的氩气冲洗可以帮助夹杂物飘浮进入炉渣，这时气体的吹速低于$0.15m^3/min$(5scfm)。在氩气冲洗过程中柔和的氩气吹速，可以防止新的热辐射表面形成。如果需要通过铁合金的添加来调节钢的成分，就要在搅拌与冲洗步骤之间的氩气调整期间进行这种调节。在其调整期($0.15\sim0.3m^3/min$或$5\sim10$scfm)的气流正好足够铁合金在钢中的混合，而不会损失在炉渣层里。以上所确定的速率大小还要取决于钢包的大小。

用于氩气吹泡的CAB和CAS方法就是为了控制给钢包的加料，并提高其精炼能力。CAB工艺利用带盖的常规钢包，并在出钢之后合成炉渣覆盖于钢液表面(见图2.2-15a)，像海绵似地吸收非金属夹杂物。通过底部的多孔堵塞进入带盖钢包里的氩气能强劲地搅拌液态金属并且形成炉渣-金属混合物，与其他氩气吹泡方法不同，这种混合物要求有完整的炉渣层保护钢液不受氧化。钢包加盖是为了防止空气进入影响金属。炉渣-金属乳化体有助于增进显微纯净化、化学成分的均质化、脱硫和脱氧。CAS工艺(见图2.2-15b)利用一根耐火衬里的通风管并让其下伸到钢液里面，故当氩气搅拌时通风管内的钢液里不会有炉渣。这样也保证添加铁合金和脱氧剂时不会受到炉渣的干扰，于是成为成分得到控制的、卓有成效的二次炼钢工艺。

AOD工艺。这种工艺适用于经济地生产含铬不锈钢。在电弧炉里加入高碳铬铁合金、硅铁、不锈钢

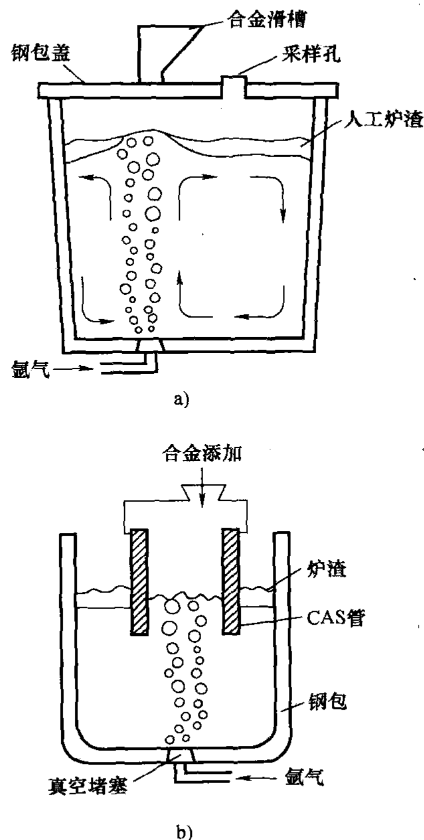


图2.2-15　氩气发泡工艺的设备布置图

a) 加盖氩气发泡(CAB)

b) 通过密封氩气发泡工艺调整成分(CAS)

废料、经焙烧石灰和氟石进行预熔化制备，并将炉料加热到规定温度。然后让钢液出炉、脱渣、称重，再转移到AOD罐里，它是一个以耐火材料作为衬里的钢桶，并将其安装在可倾斜的转炉托圈上(见图2.2-16)。如图2.2-16所示，通过钢液液面下的侧风口将

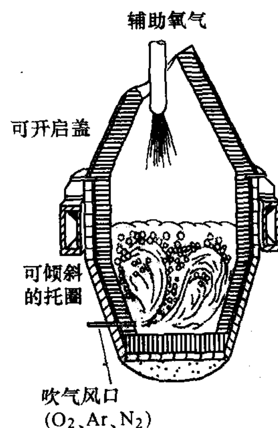


图2.2-16　氩氧脱气罐示意图

工艺气体（氧、氩和氮气）吹进去。AOD工艺的主要特点就是在脱碳热力学上的转变，这种转变就是将纯氧改成用氧和惰性气体的混合气体的吹入。

在AOD罐里进行脱碳到 w(C)为0.03%，在此期间惰性气体与氧的混合比例从1∶3增加到3∶1。在吹炼过程中，给炉子加入熔剂用于生成炉渣。脱碳吹炼之后加入硅铁，并使钢液进行短暂的氩气搅拌。然后让炉子倾倒取出化学样品，再对钢液作脱渣处理。如有必要进行调整，则应当另行加入合金元素，将钢液出钢进入钢包并倒入钢锭模具或连铸机。利用AOD工艺可以提炼得到低含氢[<2ppm(2×10^{-6})]和氮(<0.005%)的钢，而铬获得充分的利用。

ESR工艺。像VAR一样，它是用于生产电极钢锭的一种二次冶炼法，其钢锭具有与成品基本相同的化学成分，只是ESR是在正常的大气压下进行的，而且具有比VAR更高的熔化速率。ESR用于生产转子锻件、轧辊、铸模和锻压模、核密封容器壳体以及特殊形状的铸件。合金钢、不锈钢和镍基超合金一般也用ESR方法生产。电渣重熔设备是由容纳熔化炉渣和金属的底开式水冷铜铸模、大电流且低电压的交流或直流电源和电极输入机构组成的。当熔化开始时，铸模置于启动盘上，并随着熔化逐渐向上移动（见图2.2-17）。铸件通常可以生产成任何几何形状。在底板和电极之间触发电弧，以此熔化导电的炉渣。当电极端点熔化成液滴并落下穿越炉渣层时，就发生某种冶炼。随着熔化的进展，金属熔池逐渐凝固。将凝固速率调节到使熔池深度保持为电极直径的一半。炉渣的成分可以按作为脱硫剂或脱磷剂使用进行调整，并且使炉渣成为夹杂物漂浮的储槽。w(S)能降低到0.002%以下。炉渣由氟石、石灰和氧化铝组成。但是ESR工艺对于降低氢含量没有效果，因为其工艺主要是在大气里进行。ESR工艺能使用多电极，并将它们熔进单一的铸模里。产品的表面质量是非常好的，而且不要求作任何修整。

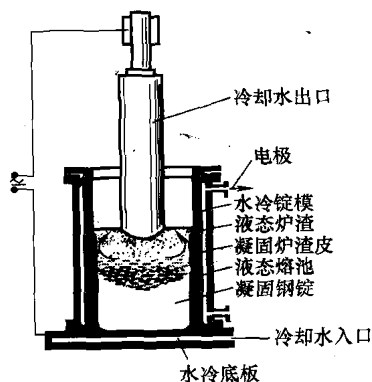


图2.2-17　电渣熔化工艺示意图

铸造

通过选择前面所述的若干工艺步骤的组合进行熔炼和精炼之后，钢液就可以进行浇铸了。在装有精炼钢液的钢包里配备有一根注塞杆装置或移门系统，在浇注一系列铸模或连续铸造的中间罐时，用于控制钢液的液流。炉子侧壁的操作工艺是炼钢过程中的关键操作之一，包括作为钢锭铸造法在钢液凝固以前的一些最后工艺步骤。因此对于特定牌号的钢，其质量很明显地要受到对炉子侧壁所采用的工艺操作的影响。当钢液几乎完全凝固后，钢锭要从铸模中脱出。固体钢锭要在一个经加热的均热炉里进行保温，并在炉里进行温度的均匀化，以便将钢锭经初轧加工成为初轧坯、方坯和扁坯等半成品。为节省能源就要设法缩短从脱模到投入均热炉的“行进时间”。另外，也能用冶炼钢包直接将钢液浇入连续浇铸的中间罐里，即将钢液直接浇铸成半成品或具有接近成品横截面形状的型钢。

钢锭浇铸

一种优质钢锭，是以均匀的理化结构、细的等轴晶、没有化学偏析和非金属夹杂物为其特征的。然而，根据铸造和凝固工艺的特点，钢锭都会不同程度地产生缩管、气孔、化学和非金属偏析、内部裂纹和柱状晶体结构。此外，钢锭一般还会在其表面形成粘砂和方格形裂纹。钢锭铸模通常是带锥度的矩形铸铁箱，其内壁以耐火材料为衬里，并且有“宽端朝上”和“宽端朝下”的两种使用方向。在宽端朝下的形式中，铸模可以有开顶或瓶顶两种。而在宽端朝上的形式中，铸模通常又安装有开式底、闭式底和堵塞底三种类型。特种优质钢的铸造目前都采用宽端朝上的形式。铸模的内壁可以是平面的、凸形面的、波纹面的或凹形面的。波纹面的或凹形面的钢锭在凝固时通过快速冷却形成较厚的初始钢锭表层，从而使钢锭的表面裂纹减少到最低限度。液态钢由顶部或底部通过耐火衬里的浇道倒入铸模。钢锭的大小和形状与其在扁坯轧机上的生产密切相关。

钢液在充满铸模时，会在模腔紧挨铸模内壁和底部的部位形成钢锭的外壳或表层。由于表层的冷却收缩而导致在模壁和钢锭凝固外壳之间形成气隙，气隙的形成将会降低钢锭的排热率。随着钢的凝固，其热梯度趋于平缓且钢锭的表层的形成也趋于缓慢。气体在钢液中的溶解度随温度的降低而降低，造成气体的逸出。氧尤其会以与碳反应而生成的一氧化碳形式逸

出。脱氧剂的加入进一步促使氧的溶解量减少。它还取决于钢的含碳量及其化学成分。钢锭根据在其凝固过程中脱氧的程度分为四大类：镇静钢、半镇静钢、加盖钢和沸腾钢。

钢锭的排热率是受铸模的厚度、形状、铸模温度，钢液的过热量，钢锭的横截面尺寸，以及钢的类型和化学成分所影响的。钢锭的尺寸要按照满足产品的要求和热变形加工设备的能力进行选择。钢锭的大小范围从几百公斤到高达300t的大型锻件。作为时间函数的镇静钢的理想冷却状态如图2.2-18所示。

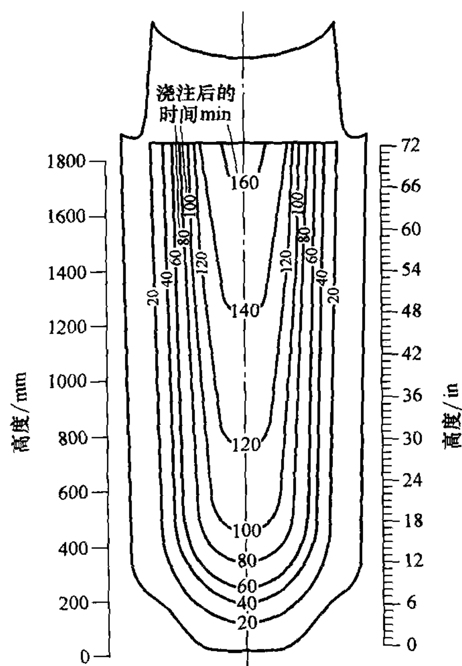


图2.2-18 全镇静钢的带冒口、宽底朝上钢锭的理想凝固模式

脱氧工序。由于钢液是在一个温度范围中凝固的，而且碳-氧的化学平衡随温度而持续变化，因达到新的平衡而从静止液态部分中释出的一氧化碳气体被逐渐截留在固-液界面上，并就此形成气孔。钢锭的组织类型是由凝固过程中的脱气状况所决定的。图2.2-19所示是用瓶顶铸模浇注的一系列按照从完全镇静钢或极静钢(1号)到强烈沸腾钢(8号)的顺序而排列的钢锭组织(参考文献[36])。通过添加脱氧剂的充分脱氧而不再有任何气体释出的完全镇静钢锭是一种以间断接通的缩孔，即所谓的缩管为其特征的。完全镇静钢一般在宽端朝上且安置冒口的铸模里进行浇铸，以限制在靠近冒口部分产生缩管。镇静钢锭的浇铸中还使用发热化合物，以使非金属夹杂物漂浮在上面，并使钢在顶部保持熔融状态。在半镇静钢中(2号)，允许有少量的一氧化碳释出，由此形成的气孔使得体积膨胀而补偿凝固收缩。铁液静压头有助于保证钢锭的下半部里没有气孔，并由于气体的聚集而形成的压力使其顶面凸出。在3号钢锭里因更多的一氧化碳释出，以致产生更大量的且超过补偿收缩所需的气孔。一部分气孔生成在钢锭的上半部接近侧表面的部位，因此对其表面质量是有害的，并导致在后续的热变形加工中出现表面缺陷，即所谓的疤痕。当气压穿透初始凝结成的顶部表面，迫使钢液因其迸裂而挤出表面造成其表面的回涨。过度的回涨会给日后利用这种钢锭所轧制的产品形成海绵状表面。

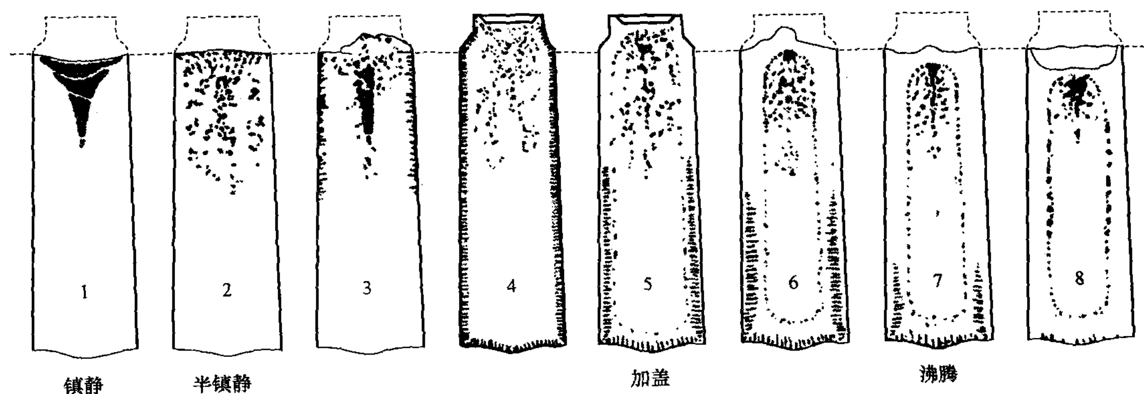


图2.2-19 八种典型的钢锭生产条件，在一样的瓶顶锭模里浇铸，与气体在里面的回旋受遏制的程度有关。虚线表示每一种钢锭的钢液在刚倒入时的高度。根据碳及更重要的氧含量，钢锭的组织从全镇静钢(1号)到强烈的沸腾钢(8号)

5号钢锭代表一种典型的加盖钢锭，由其释出大量的气体从顶部延伸到底部形成无数蜂窝状的气孔。钢液倒入后，由于这种气体的上逸而导致钢液表面的上升，同时发生沸腾的现象，即所谓的沸腾作用。使用一个金属盖子压在铸模的顶部，这种作用就停止了。这时在释出气体的作用下气孔向上延绵，以致形

成厚实的表层。随着这种释出气体的延缓，在钢锭的中部形成蜂窝状的气孔。这些气孔在钢锭经受轧制的时候，并不会在表面形成任何缺陷。7号钢锭是一种典型的沸腾钢锭组织，其气体的释出非常强烈，气孔只是局限于自上而下的第二个四分之一的部位里。因气孔而使体积显著增大，以致抵消在凝固过程中所发生的收缩，于是形成相当平坦的钢锭顶表面。参考文献[37]阐述了不同类型钢锭的生产，包括在钢锭所选用的浇铸工艺中气孔和缩管的形成。

主要铸造缺陷。在钢锭里会产生多种铸造缺陷，如偏析、夹杂物、针状组织的生长、龟裂、内部或表面裂纹以及表面粘砂等。钢锭的类型、大小和钢的化学成分主要影响铸钢件中的偏析。最早凝固的是非常接近铸模内壁的部位(即冷却区)的金属，其化学成分与倒入的钢液非常相似。然而随着凝固的速率逐渐减缓，碳、锰、硅、硫和磷及其他一些元素含量低(即较为纯净金属)的枝状晶体优先凝固。枝状晶体会排除这些元素进入尚未凝固的钢液里。于是最后凝固的材料就要最大量地包含这些被排除的元素。偏析表示某种化学成分相对于它在整体材料中平均含量的偏离。正或负偏析分别指的是某种元素相对于其平均含量的增加或减少。硫的偏析可能性最大，然后依次为磷、碳、硅和锰。需要较长时间凝固的大型钢锭会有更大的偏析。由气体的上逸所形成的对流或涡流对钢液进行搅拌时，偏析的趋势会因此而增强。因此作为镇静钢发生的偏析是最小的，而沸腾钢的负偏析沸腾区与正偏析的核心区域之间会显示出一条明显的界线。然而在镇静钢中沿钢锭的轴线会发生“V”形偏析，并使其形成轴向疏松率。在凝固过程中，由于钢锭扰动而造成倒“V”或“A”形的偏析，并产生所谓的钢锭形式的缺陷(参考文献[38])。

冷却区或紧邻铸模内壁首先形成的钢锭表层具有小且随机取向的晶体结构，接着的是以枝状结构为特征的大型枝晶体的生长。各个枝晶的生长主要沿垂直于表面的纵轴方向而发生的，还能以所有各种方式向钢锭的中心延伸。特别具有这些大的、经延伸的枝状晶体的钢锭也被称为具有一种柱状组织。这种钢锭如果在初轧过程中经重载轧制就有可能产生严重的裂纹。通常，柱状组织容易朝向钢锭中心形成大的、等轴的、随机取向的枝状晶体组织。柱状和等轴枝状的晶体组织占的相对比例取决于钢的成分、铸模的温度、浇注时的温度以及钢中气体的含量。在凝固过程中，有时可以通过不同的机制让钢液进行运动，以此减少或消除柱状枝晶区的形成(参考文献[39])。通过消除液体心部的过热，即将液体心部的温度降低到钢的液线温度和通过在液体的心部产生核分裂碎片，都可以达到上述目的。通过柱状晶枝枝头的重熔或机械破碎的方法实现核分裂碎片。长柱状晶体因为其内聚强度较差，故对于会因此阻碍在热轧温度下的塑性流动的较高合金牌号钢，尤其应避免其产生(参考文献[40])。

通过加热、冷却和轧制工艺可以在钢锭的内部产生拉应力，并因其产生严重的内部爆裂或裂纹。如果进行充分的热变形加工，则这些裂纹只要尚未延伸到表面就能完全焊合在一起。

在冷钢锭的表面或在初轧过程中，都能看得到纵向或横向的裂纹。这些钢锭裂纹都是由于过高的浇铸温度所造成的。强度差的枝状晶间区形成于钢锭的表面并向中心延伸。如果浇铸温度低，则会生成较大数量的短枝晶。横向的钢锭裂纹也是由于熔化金属在铸模内的涌动而在钢锭表面形成的断点所造成的。改进铸模设计和使用铸模涂料都有助于因液体涌动而形成褶皱(原文如此——译者注)。增加钢的含碳量可以减少横向裂纹的发生。沿铸模的边缘存在的毛刺会造成一种状如起锭器的横向裂纹的形成。铸模的拐角形状或缺口铸模的应用会导致纵向裂纹的产生。一般，通过铸模和冒口的适当设计都能减少这类铸造缺陷。用于钢锭铸件的水泥砂型铸造也表明可用于改善钢锭无裂纹表面。

氧化材料和硫化物，通常二者结合，都会在钢中产生非金属夹杂物。在大部分情况下，这些都是脱氧的产物，它们在二次炼钢和浇铸的时候又没有被清除。有时它们也是因钢包、炉子或铸模所用的耐火衬里经腐蚀而进入到钢里。

在顶注钢锭里，钢液液流冲击模底，并飞溅到铸模下部的模壁上。随着液面上升，飞溅逐渐减弱。然而，对于金属熔池，如果上升的速度减慢，冷却了的飞溅材料就会氧化并粘附在钢锭表面，成为有损表面的结疤。而后在钢锭轧制时，这些因钢液上升而褶皱为大块的结疤就会被轧成冷隔或裂片状的缺陷。于是在扁形产品的亚表层里，产生平行于褶皱的裂纹，并成为表面的薄层。较快的浇注速度通常可以避免这类缺陷。底注钢也不会产生这类裂纹，因为钢液是从铸模的底部进入，而不会产生飞溅且液面能均匀地上升。钢锭可以通过刮皮修整去除大块的表面缺陷。而一些小的缺陷则可以在粗(初)轧的过程中被除去，因为在初辊轧的过程中，氧化皮被碾碎并得以清除。

连续浇铸

经过冶炼的钢液直接凝固成为初轧坯、方坯、扁

坯和圆钢等半成品形状的连续生产工艺被称为连续浇铸。钢液被注入一个被称为中间罐的钢液熔池里，再经由喷嘴注入一个连续浇铸模。在连续浇铸中，能生产出熔化生产率高达95%的半成品，而与之对照的钢锭浇铸/初轧工艺只能生产出80%左右。目前，全世界有65%~70%的成品钢是用连续浇铸生产的。电弧炼钢炉与小型的初轧坯、方坯、扁坯浇铸机的组合，已成为具有经济高效且特征简单的微型轧钢厂的形式。第一条方坯、扁坯的浇铸生产线建于20世纪50年代早期。

连续浇铸还能改善钢的质量，因为在中间罐和铸模中，钢的纯净度可以得到更好的操控，并通过受控的冷却获得合适的凝固组织。用钢锭浇铸也能得到高质量的纯净钢，尤其是高碳、低氧牌号的钢。对于像轴承钢这样的特种牌号钢，钢锭浇铸有其优势，因为通过热变形加工，在初轧中可得到较大的压缩比，从而有更加致密的内部组织。如果要制造大型轴承，对于某些轴承钢要求最小要达到从30到1的压缩比，这对于连续浇铸的方坯甚至初轧坯都是做不到的。

由于能从初轧、钢液浇注和均热炉的钢锭加热的三方面消除废品的产生，所以与钢锭浇铸比较，连续浇铸的熔化生产率的改进还是主要的。此外，短锭、锭头及一般的铸坑废料也降低了钢锭浇注的熔化生产率。由于管缩和高夹杂物含量，用钢锭浇铸的钢锭免不了要将其顶和底的两头截去。从另一方面去理解，对于一条任何铸件大小和浇铸机数量都已确定的、能不停顿地运行(多炉次连续进行)的浇铸线而言，其浇铸线越长，则其熔化生产率也就越高。

产品质量的改善得益于较少的化学成分的波动和较好的凝固特征。无论方坯还是初轧坯，其沿纵向长度还是其横向截面的偏析都要达到最小。但是连续浇铸的夹杂物含量会高一些，特别在转接区(在炉次改变时的材料浇铸)，以致如前所述，给轴承类钢带来有害的结果。更进一步，鉴于连续浇铸产品的表面缺陷(裂纹、疤痕等)比由钢锭经初轧后的产品表面要少，所以在精轧之前对其坯件表面进行精整的要求也就减少。这也能提高熔化生产率。一般来说，连续浇铸的产品在内部和表面所存在的缺陷都比较少。

取消保温和初轧工序还提高了连续浇铸产品的能耗率：连续浇铸较高的熔化生产率也就降低了处理每吨钢的能源消耗。由于半成品在精轧之前从浇铸机出来即趁热装入再加热炉，因此大大提高了连续浇铸的热效率。用于钢锭再加热的均热炉需要燃烧燃料并成为污染源。通过减少钢锭的工艺步骤并形成较高的产量，连续浇铸所要求的投资和运行成本则大为降低(参考文献[41])。

工艺描述。图2.2-20a所示是连铸机的主要部件。一台连铸机基本上由一个液态金属的熔池和送进系统，即中间罐、水冷铸模、带保持装置的二次冷却区、弯曲和校直轧辊、剪切设备以及冷却床或输出辊道组成。一台连铸机可以有多条铸流(同一个中间罐的数个液流出钢处)，每一条都配备有铸模、二次冷却和保持装置和剪切台等。铸流的数量取决于炉次的大小和浇铸的形状。

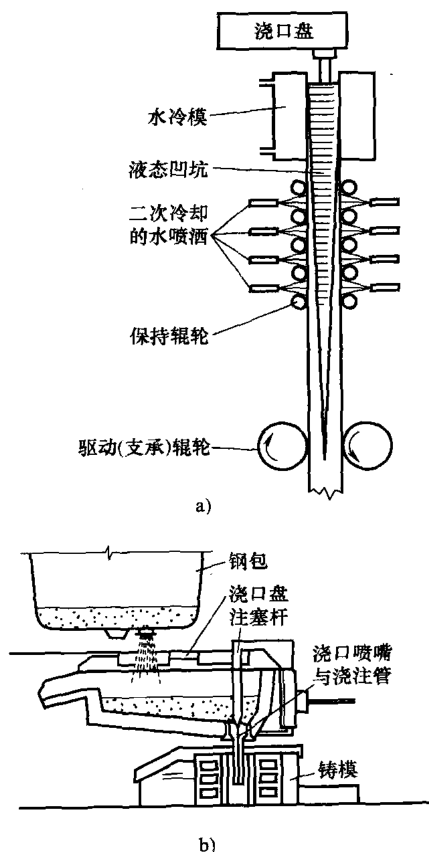


图2.2-20　连续浇铸

a) 连续浇铸机的主要部件　b) 钢液从钢包流入浇口盘，再从浇口盘进入铸模

浇铸过程从铸模底部插入的引锭杆开始，引锭杆与外部的一套拉动系统相连接。将经过熔炼的钢液从钢包以所控制的速度注入中间罐，并充满到一定高度。钢液再由中间罐经过喷嘴注入铸模(见图2.2-20b)。当铸模里的钢液液面达到一定高度时，以预定的速度拉动引锭杆。浇铸速度取决于机器的特性，如浇铸截面、冷却效率、金属从中间罐注入的速率和所要求的浇铸组织。当引锭杆的头部到达拉动台的一定位置并接近所浇铸的凝结形状时，将其截断并取下引锭杆。

然后，凝固铸件继续通过拉动系统到达剪切台。

在水冷铸模里，从钢液的凹形液面之下开始凝固，并在与铸模壁接触处形成表层外壳。从其液面的高度到完全凝固点之间的距离，即所谓浇铸机的冶炼长度。铸模作垂直方向的震动，以防止凝固的表层外壳与模壁发生粘结。此外，铸模制成锥形，以保证与模壁相接触的凝固表层外壳能有较好的冷却效果。通过使用铸模化合剂或润滑剂，如能形成流体炉渣的油或熔剂，使模壁与固体表层外壳之间的摩擦降至最低限度。通过建立一些浇铸条件，以保证当钢壳离开铸模时有足够的厚度和强度承受铸模里的铁液静压力。材料在到达剪切机前往往已完全凝固，而且在很多情况下在到达校直机前就已经成为固体了。为了完全凝固还要在二次冷却区进一步散热。在上述区域还利用水和/或水汽的喷洒冷却，以此保持最佳的冷却速度和铸流的表面温度。支承辊为铸流导向并防止因铸流心部熔池内存在的铁液静压而造成局部的凸出。通过冷却截面的设计，可使坯件的内外产生的缩孔裂纹和缺陷减少到最低限度。在经过二次冷却之后和在切断成所要求的长度以供进一步处理之前，还要在热态或冷态条件下进行的弯曲和校直。有些连铸机还能通过更换铸模浇铸一种以上形状的坯件(参考文献[42])。

多年来，在通过逐步降低机器的高度以提高铸造产品质量的同时，使装置的投资成本得到降低。老式的装置是立式的机器，并且用的是直模和在垂直位置截断，而目前较新的装置，则使用带弧形模且能渐渐校直的弯曲型机器。新型扁坯浇铸机常常都是弯曲型的，因为扁坯不能在二次冷却区自我支承，而初轧坯和方坯能够自我支承，故可以在立式机上浇铸。一般来说，浇铸材料的形状、产品的生产率和质量，以及成本决定了所选用设备的类型。

基于连续浇铸质量的设计特点

温度控制对连续浇铸比对钢锭浇注更为关键。必须保持足够的过热以使载有钢液的钢包从出钢口移动到浇铸台，并防止中间罐在喷嘴处发生凝固。同时过度的高温也会造成铸模里的凝固不充分，以致脱模后发生断裂。低过热铸造能获得比高过热铸造有更大的等轴结晶区的也更为均匀一致的铸造组织。因此在钢液注入中间罐以前，通过钢包的多孔塞或从顶部插入的通气管输进氩气，并借助气泡沸腾实现其温度的均匀化。

连续浇铸必须是完全镇静钢(脱氧的)，以避免气孔或针眼被封死在铸件的表面里面，因为它们会在以后的轧制过程中形成疤痕。其完全脱氧主要通过对于粗晶粒钢的硅脱氧和对于细晶粒钢的铝脱氧而实现的，然而铝镇静钢会因为中间罐喷嘴被氧化铝沉淀物的堵塞而造成问题。优质钢一般在浇铸之前使用钢包精炼工艺，并用专门方法避免喷嘴堵塞。

钢液从钢包连续或半连续地注入中间罐，并通过多个喷嘴以连续的金属液流分别进入各个铸模里(见图2.2-20b)。利用注塞杆或者液压控或电控滑门把钢液从钢包转移到中间罐里。

中间罐的作用。中间罐的底部装有喷嘴，它主要起到金属进入铸模的分配器的作用。金属的流动方式对产品质量是非常关键的。液流控制装置，例如中间罐上的耐熔挡板和溢流孔用于分配金属液流，尽量减少对液流的扰动并消除液流的死角(参考文献[43])。这些装置可提高进入铸模的液流稳定性。有效的冷态模型化工作要在这些液流控制装置的优化配置设计之前进行。钢液要从离喷嘴尽可能远的地方直接倒入一个耐磨盘里。要求在距离中间罐喷嘴之上恒定的钢液高度上，让钢液以固定的流速流出，且一直保持浇铸速度的恒定。中间罐还有金属熔池的功能，即在多炉次的顺序浇铸中，需要在钢包进行倒换期间浇铸也不至于减弱。为此，在最短的时间内进行钢包转换是绝对必要的。

中间罐在冶炼方面的作用就是有利于夹杂物和炉渣从铸模入口分离出来。为此，金属在中间罐里的储留时间是满足这个要求的一个关键因素。中间罐在金属倒入前要进行预热并常需盖上盖子，最大限度地减少热的辐射损失。中间罐的喷嘴是定径(或开口的)喷嘴或注塞杆喷嘴。定径喷嘴基本上以喷嘴内径和喷嘴以上的铁液静压力(即中间罐以上的钢液高度)控制钢液流出的速度。它们一般用于硅镇静钢初轧坯和方坯的浇铸。注塞杆喷嘴则用于铝镇静钢扁坯的浇铸，通过在喷嘴开口处提升或降下注塞杆，借以操控其流量。氧化铝的堆积和堵塞如果没有其他方法予以防止其堆积的话，可以通过提升注塞杆进行补偿。特别在钢包倒换时，夹杂物的含量会升高。连续浇铸中供夹杂物漂浮的时间比钢锭浇铸要短得多。然而借助于浇口注塞堵头和喷嘴的现代化装置可以通过氩气沸腾防止发生喷嘴的堵塞。另外，在浇铸以及更换喷嘴尺寸期间，滑门系统也有变化喷嘴功能。

遮蔽。为了满足特种钢对其表面和纯净度的严格要求，有必要使用封闭的液流并进行遮蔽浇铸。因为开式液流浇铸会吸入氧气或氮气形成夹杂物，而因此降低钢的特性。从钢包到中间罐和中间罐到铸模的遮蔽，一般用于保护钢不受空气的侵蚀，特别铝镇静牌号钢有生成氧化铝夹杂物的潜在风险。惰性气体和耐

火管是常用的遮蔽方法。耐火管遮蔽是用熔融的氧化硅和氧化铝石墨制成的。图 2.2-21 所示是钢包到中间罐和中间罐到铸模的耐熔管遮蔽系统的例子。

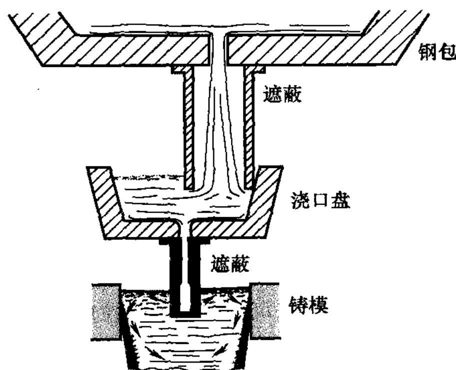


图 2.2-21 耐熔管遮蔽系统，用于浇注时尽量减少氧化

铸模特征。铸模具有部分凝固钢液的功能，而且通过凝固使其从铸模里脱出后，表层的厚度和形状、温度的分布以及表面和心部的组织都能满足适当的要求。铸模是一种开口的容器，内部以铜合金作为衬里而外部以钢结构为支撑，在衬里与钢结构之间通以冷却水，将与铜衬套相接触的钢液凝固时的热量带走。铸模都是管道状或平板状的。小型的初轧坯和方坯连铸机都使用单体式管状薄铜衬里的铸模。而平板铸模由四件粘附在钢板上的铜衬里组成。在某些设计里，相对的平板可以调节用于浇铸具有不同矩形的扁坯形状，因此更为实用。平板铸模也可改变其拔模斜率以适应不同牌号钢所要求的不同收缩特性。加银铜合金应用于高温强度。表面镀以镍和铬的衬里具有较硬的工作表面，并防止铸流表面让铜沾染。热和机械应变会造成铸模的变形，并因此影响产品质量。铸模中的凹形液面，即钢液温度最高处也就是其热应变变形达到最大的地方，并由于铜的屈服强度比较低而造成铸件的永久变形。铸模也会因其出口端的磨损而出现倒锥的现象(参考文献[44])。

连续浇铸中的热传递

通过模型和工厂验证，铸模里的热传递状态已得到充分的研究(参考文献[45])。最主要的横向热传递被认为是一种源自心部的钢液经过一系列热阻和冷却系统水交换器的热能流。热传递发生在：①凝固的铸件中；②从铸件的外壳表面到铜衬里内表面；③经过铜衬套；④从铜衬里外表面到铸模的冷却水。钢铸流由于温度的降低而发生的显热变化(指一种物质在温度变化的过程中吸收或放出的热量，而且其温度的变化并没有伴随发生物质状态的变化)，以及由于相变由铸件在凝固过程中所传递的热量构成的潜热释放。此外，金属液体与铸件表层外壳之间存在着一种糊状区，其厚度取决于钢的含碳量。还有，从凹液面到铸模底部的固体表层外壳厚度是连续地变化，并且通过传导在这个表层外壳里传递热量。从外壳表面到铸模模壁的热量传递是很复杂的，并由于在铸模内壁与发生收缩的浇铸外壳表面之间有可能形成气隙，故同时以辐射和传导的方式进行传递。作为有可能沿纵向和横向方向形成的大气隙代表一种最缓慢的热传递区段，并因此由其控制整个热传递的速率。在内部钢液静压力的作用下，铸件的鼓起有可能极力使这种气隙减小时，远离凹形液面的表层外壳的厚度增加将阻碍上述铸件的鼓起。因而气隙的形成也是一种动态行为。由于铸模锥体会使气隙减小，而增强热的传递。在铜衬里，内壁的热传递也要受所使用的铸模熔剂和润滑剂的种类和数量的影响。能润湿铜的熔剂和油都有助于热的传递。一般来说，沿铸模长度方向的局部热通量正是凹形液面下的为最大，并且沿铸模长度方向逐渐减少。作为整个铸模的平均热通量是随浇铸速度的提高而增加。通过衬里的热传递主要靠传导，并取决于铜的热导率及其厚度，而在冷却水里的热传递靠的是强制对流。水流的速度和压力控制经由它的热传递。通常，方坯连铸机的冷面温度较高，因为其铜衬里的厚度要比扁坯连铸机的更薄一些。水流必须以适当的流量、温度、压力和质量均匀流经铸模的通道。通常水流垂直向上流入铸模。要求以最佳水压遏制其沸腾，并防止铸模发生机械变形。水的质量也很重要，因为若在铜衬里上生有锈皮，则对于热传递和铜的强度都是有害的。为维持合适的流速，作为水流区里的挡流板和水箱也很重要的。水流的进出口温度差 ΔT 可以作为衡量铸模冷却效率的一个好标志，它的高、低或不等模面值分别反映了水流速度低、生有锈皮和不对称的浇铸液流。两个模面上的温差不相等也许说明铸流的轴线没有对准。

铸模的振荡和润滑。为了将发生烧穿(即钢液从铸件凝固的表层薄外壳内冲出，或者冲出铸模外面)和在铸模和铸流之间形成粘结的危险性降低到最低限度，铸模要进行润滑和振荡。各种液压或机械的传动装置用于铸模的往复运动。铸流与铸模之间的粘结会由于铸模里的局部粗糙表面或表皮上形成的拉应力而变得更加严重。一般都利用一条逆向拉带使铸模以大于浇铸的速度移动，以此在其固体外壳产生压应力，借以闭锁表面的裂隙和疏松。向上的行程快速进行，很快铸模又回到其起始的位置。

液体和固体型的铸模润滑剂都有使用。当浇铸硅镇静钢方坯或初轧坯时，使用半精炼矿物油或植物油可沿模壁表面形成一层膜。而当浇铸铝镇静钢扁坯或初轧坯时，采用带有耐熔潜管的固体铸模熔剂或熔粉。这些固体润滑剂还有助于铸流-铸模的界面上的热传递，并且为凹形液面处的钢液提供热绝缘和再氧化的保护。铸模熔剂还能帮助吸收非金属夹杂物。当铸模熔剂进入与钢液相接触时，它们就会熔化并达到流最佳动性。固体熔剂为含有少量碳的 SiO_2-CaO-Al_2O_3-Na_2O-CaF_2。避免加入氧化铁，以防止发生再氧化。熔剂呈现为烟灰状基体，或为合成生产的糊状物或颗粒状粉末。

冷却特征。由二次冷却、铸流密闭和拉送机构整合成为一个集成系统，特别是在现代扁坯浇铸机更是如此。金属从铸模中脱出之后，在多对滚轮支承下拉送进入切断台，同时通过二次冷却区控冷。二次冷却又细分为一系列位于装置滚轮之间开口的区域。为实现更为均匀的冷却，在较为新型的装置里用喷水雾代替传统的喷水冷却(参考文献[46])。在以一种牌号钢所规定的速度进行浇铸时，为了完全凝固并调节铸流中的热梯度及其表面的温度，要求在二次冷却中提供适量的水。二次冷却还可帮助冷却托架滚轮。不适当的热梯度会造成内部和表面的裂纹以及形状的变形。过度或不足的冷却会造成热应变，并会在高温下超过其表层外壳的低延伸强度。不适当的冷却还会导致其心部液态的热量对表层外壳的再度加热。从喷洒冷却到辐射冷却要求平稳过渡，以免被再加热。不但要利用循环水系统还要通过在冷却区域里喷嘴间距的合理设置对水流量进行分配(单位接触表面的水量)。水量的变化可用于补偿浇铸工况的变化。

铸流的移动。铸流是在一系列托架滚轮的支承、导向和驱动下，以一种可控制的速度从铸模的出口移动至切断位置，这些滚轮沿水平方向从铸流两个相对表面之间延伸通过。托架上还有许多在垂直于浇铸方向的另外两个侧面上安装的边缘滚轮，托架由此得到进一步的加强。托架可将浇铸过程中产生的机械应力和应变降低到最低限度。铸流被支承在铸模下面的所有四个面上和更低位置的两个面上。正对着铸模下面，铸流产生鼓凸的可能性最大，这时表层外壳薄而铁液静压又高。还有靠近铸模处的滚轮间距比远处的要小。成排的滚轮除了要夹持其铸流之外，还要沿着预定弧线排列，使铸流从垂直过渡并引导到水平，为此它们必须有足够的强度以承受弯曲作用力。三点弯曲或通过半径递减的三段圆弧弯曲是现代连铸机所采用的方法，以此可确保其表面质量得到改善，而急剧的弯曲会在表面产生裂纹，这是因为弯曲过程中，在其弯曲的外表面上会形成过度的拉应力。经历弯曲之后，铸流通过一台多滚轮的校直机，用于将铸流的弯曲扳直，并且消除其水平面上的拉应力和压应力。目前在大部分连铸机里，都使用不再需要进行弯曲的弧形铸模。铸流可立即通过校直滚轮。

铸流借助机身上垂直、弧形和水平安装的驱动滚轮拉送而出。这些滚轮趋于给铸流的表面施加压缩力，以此提高其表面质量。于是，其目的就是要“压”而不是“拉”着铸流，使其从连铸机中通过，后者会产生拉应力以致表面缺陷。因此驱动滚轮应置于弯曲滚轮之前，而有可能以此消除拉应力。驱动铸流前进所需要的推力分布在众多成对的驱动滚轮上。为了防止形状的变形必须避免驱动滚轮以过大的力夹持铸流。接着，铸流被送上切断工位，其小头用机械方法切除，而大头用割炬切除。

生产率和质量

自从20世纪60年代连续浇铸投入生产应用以来，利用若干技术在生产率方面已获得了巨大的收益。通过以下方法使停机时间得以缩短：①缩短浇铸炉次间的机器设置时间；②减少更换铸模的时间；③减少因铸流断裂而引起的停顿次数；④将出炉钢液的成分和温度超标降低到最低限度；⑤削减设备维护的需求。除了改进钢的冶炼工艺和连铸机的设计之外，顺序浇铸的出现、扁坯的氧燃割炬纵向切割以减少换模次数和减少备用铸模的库存、不同宽度调节的铸模、剖分式铸模、顶注引锭杆以及用于直接辊轧的热态装料都能明显提高生产率。应当认识到热态装料意味着需要热态表面的准备和一些检验步骤，而且要求通过连铸机自身对表面粗糙度进行最佳控制。

连续浇铸的产品质量取决于炼钢和浇铸的工艺，表面缺陷包括横截面变形，纵向和横向的裂纹，折皱、锈皮和陷入夹杂物，及铸模的震痕。还会出现亚表层的针孔、气孔、夹杂物和裂纹，而成为疏松、夹杂物、偏析和裂纹等内部缺陷。应用特种技术可以尽可能减少这些缺陷。通常可以通过合适的铸模、以可控的浇铸速度进行二次冷却、铸模润滑、铸模镀层、铸模的磨损控制以及机器的调整减少外部的裂纹。而通过机器的准直、电磁搅拌、在线还原、多点校直、压铸以及温度和浇铸速度的控制，则可以将内部裂纹和疏松降低到最低限度。

折皱和结疤是因为中间罐与铸模之间的浇注液流完整性的缺失和浇注的速度不合适而造成的。震痕一般产生于所采用的铸模振荡形式。适当的脱氧和浇注

液流的遮蔽可以消除气孔和针孔，而偏析则要用电磁搅拌、过热控制和浇铸速度降低到最低限度。冶炼、脱氧和遮蔽技术的改进，则可以防止夹杂物的形成。为了不必事先进行表面修整便能轧制板带产品，目前已经促成"纯净"钢的生产、电磁搅拌和在二次冷却区进行雾化冷却等项技术的发展。由于这三项技术的开发，使得表面裂纹的产生几率大大降低。

纯净钢技术包括在脱氧或再氧化的过程中尽可能减少夹杂物的生成、降低耐火材料的剥蚀和在浇铸前加强夹杂物的分离和去除。硫化物和氧化物的夹杂物形态的控制也是十分关键的。这些控制都是借助不同的工艺措施实现的，例如无渣出钢、钢包冶炼、遮蔽所有开放的金属液流、合适的耐火材料选用、合理的中间罐设计、铸模粉的使用以及电磁搅拌。

电磁搅拌(EMS)。在凝固过程中利用磁场搅拌钢液可以：提高其内部质量(减少偏析、裂纹和疏松)、通过流动形式的改进提高亚表层的纯净度、降低浇铸参数的临界值(浇铸的温度和速度)、通过较高的浇铸速度而提高生产率。EMS在方坯连铸机上的初步应用已清楚地显示出柱状区的减小和等轴晶体区的扩大，从而减少了中心线的偏离。在安置于铸模里的旋转EMS系统中，一个旋转磁场会驱使钢液作圆周运动。这种流动破碎了枝状晶体的枝尖并且为等轴晶体的生长提供形核的晶格点，而把较轻的夹杂物推向方坯的中心并由此形成固体外皮。直线型EMS系统安置于铸模的下面，以此产生垂直的环流形式。当以与旋转式搅拌器相同的作用原理形成更多的等轴晶体时，夹杂物得以均匀地分布。在扁坯连铸机里，特别使用EMS搅乱进入铸模的金属液流的流动形式，从而减少液流对液体熔池的穿透(参考文献[47])。

雾化冷却。二次冷却区里，用传统的水喷洒会使表面裂纹的产生更加严重，因为其冷却在纵向和横向都是不均匀的。在不同的部分所洒附的水量也会造成局部过冷。汽泡和蒸汽膜的形成会干扰热的传递。空气-水的雾汽可以改善冷却特征，这是因为有较好的热传递，有压缩空气去除水蒸气，以及使用的水量也较少。从一边至另一边的温差比较小，也不再有水洒附在托架和驱动滚轮上。利用一个雾化喷嘴喷射成空气-水的雾汽，水和空气先在这个喷嘴中混合再借助压力喷射而出(参考文献[46])。

特种连续浇铸工艺

除了作为传统的以立式机器浇铸方坯、扁坯、初轧坯和圆坯的方法已在全世界大量应用于生产以外，现在又开发了各种新工艺，以此降低投资成本、提高产品质量并适宜于浇铸较小的截面尺寸。这包括水平浇铸、旋转连续浇铸和带钢浇铸。这些工艺可详细参阅参考文献[48]。

水平连铸机只需较少的投资成本和较小的占有空间。浇铸截面本身具有较低的铁液静压，故造成的铸流鼓凸也较小，从而也不需要通过校直和弯曲来降低导致铸件成为裂纹敏感钢种的应力。从中间罐到铸模过程中，也不再发生再氧化也是很有益处的。在旋转连续浇铸中，铸流和铸模都进行旋转，以此产生离心力，使得模壁与钢液之间能紧密接触。这也可以在凝固的初始阶段形成高的热吸收率。

在带钢浇铸中，扁钢由钢液直接浇铸而成，不需要经过扁钢热轧机对窄扁钢进行轧制。由于取消了带棒的再加热和扁钢热轧机，并提高了传统带钢生产工艺的熔化生产率，从而实现了成本的显著降低。现在厚度小于1mm(0.04in)的带钢也可以直接浇铸。

热轧

钢的所有与其纯净度有关的内在质量特征都是在二次冶炼和浇铸过程中形成的。作为粗轧和精轧的后续工序基本上都是为了控制产品显微组织及其性能的技艺和理论。轧钢工艺的特点都与在特定温度下或温度范围内横截面压缩量的精确控制以及其产品的冷却方式有关。许多种类的钢产品都要求在轧制后进行热处理，以便获得所需要的显微组织，因为仅仅轧制后的显微组织还不够好。热变形加工的其他一些工艺，如锻造和冲压将在本手册的其他章节中阐述。有一些最终成品除了热变形加工还需要进行冷变形加工，特别是一些扁平或圆形的用于取得强度和/或流线组织。带或线状的产品要求在一定的温度下增加盘绕的工序，因为最后所形成的显微组织将由盘绕条件下的冷却形态决定。在热变形加工工序中的初轧和精轧之间，作为半精轧钢要求进行一次表面处理，即所谓的精整，特别是当它们从钢锭开始轧制时。

初轧

初轧也属于初始的钢锭开坯轧制，用于生产初轧坯、方坯、扁坯和圆坯的半成品型材。如果是连续浇铸，则这些型材直接按铸模的形状形成。上述形状之间并没有明确的界限，正如有些是重叠存在的。方坯和初轧坯倾向于方形的，而扁坯则是扁长的。初轧坯的横截面要大于方坯的。型材的进一步细分要根据最终的产品形状来确定，如管状圆钢、板坯和窄扁钢等。一般来说，方坯与初轧坯之间的区分在于125×125mm(5×5in)的横截面大小。这些型材的长度则取

决于初始钢锭的大小、成品的尺寸以及轧机的能力(参考文献[49])。

钢锭的横截面首先被压缩成方形、扁长形、圆形或其他常见的带有圆角的形状。在加工的过程中钢锭的长度随其横截面的缩小而增长。把锭头截掉，并把轧坯切成所要求的长度可供进一步的轧制。常常要求把钢锭直接轧制成产品，这样可省去中途再加热。然而这种工艺更适用于大截面的最终产品，例如大型工字钢梁和铁轨。初轧机按其工作轧辊的中心距离标称。通常初轧机都是多机座的轧机，其大小表述与其第一机座有关。所有初轧机的基本功能都是压缩横截面并按照要求的长度及重量截断，这一切都是让毛坯通过一系列的轧机来完成的。由初轧产品生成的锭头和轧制废料是有用的，可投入到炼钢的转炉里再利用。

在初轧中，要经历一系列热和机械的操作过程。钢锭温度的再加热和均匀化是在均热炉里进行的(参考文献[50])。其温度经优化可以在轧制过程中使钢保持充分的塑性，还要尽量缩短在均热炉里的过分加热。首次轧制即开坯或粗轧，就是在热变形加工中通过重轧压力和再结晶，将钢锭的粗大晶粒结构破裂成为一种精细的结构。当钢锭一进入第一组轧辊里时，在均热炉里形成的氧化皮就立即被除去，这主要是防止氧化皮嵌入表面。钢锭浇铸中形成的凝固孔隙被熔焊封闭。当轧钢件继续进入后续的轧机时，钢坯的横截面被进一步压缩。截去分别为物理型(鱼尾状)和化学型(高夹杂物)两种不适用的头部。然后将半制品按照要求的长度和重量截断，如不需马上作进一步的轧制，则让其冷却。

初轧机机型。对于大部分的初轧机，一台轧机都要求能进行一次以上的压缩。在这种情况下轧机的轧出工作台必须有一个机械手的装置让轧过的工件返回，轧辊还应能反转。如同在一些老式的装置里，如果轧辊不能反转，则必须有一种装置使轧钢件回到轧机的入口一侧，再通过或承受一次辊轧。同时调整轧辊间的位置以生产出所要求的横截面。扁坯和初轧坯的轧机里的基本工作原理就是在两个转动的轧辊表面之间，钢锭被逐步压缩。钢锭的物理特性不允许全部压缩通过一次辊轧就完成。因此轧制钢锭的轧机必须设计成具有进行顺序连轧的效率和能力。

普通的初轧机类型包括双辊反向轧机、串连式双辊轧机、三辊轧机、三辊方坯轧机、横穿式方坯轧机，及其不同的组合。双辊可逆式轧机由于能轧制不同尺寸钢锭，是一种最为通用的轧机(由其名可看出,双辊轧机是由一上、一下两个轧辊构成的)。轧辊可以正反旋转。压缩就在其两个方向的转动中完成。这些轧机的生产率都较低。因此利用不同类型的轧机组合提高生产率，例如不同尺寸的双辊轧机的串连式排列。高程初轧坯和扁坯轧机都是具有特殊轧制能力的不同类型的双辊可逆式轧机(参考文献[50])。串连式双辊轧机由若干个双辊单机组成，它们之间保持轧钢件可以活动的间距。通常坯件在一台轧机里只轧制一次。每一台机器都按照理想的压缩量设计的，也不会因轧辊反转而浪费时间。这些轧机受限于所要轧制的钢锭尺寸，而且建造较为昂贵。串连式双辊轧机通常用于钢锭的粗轧，以供最后轧成扁坯和方坯。在三辊轧机里，上辊和下辊以相同的方向旋转，而中间的轧辊以反方向旋转。辊轧压缩是在上、中轧辊间同方向和中、下轧辊间反方向之间交替进行的。在轧制过程中，利用一个升降工作台将钢轧件放置在所要轧制的一对轧辊之间。由于这种轧机的轧辊旋转速度都是不变的，因此对初轧来说太快而对终轧来说又太慢。初轧机轧制和操作单元的设计可详细参阅参考文献[50]。

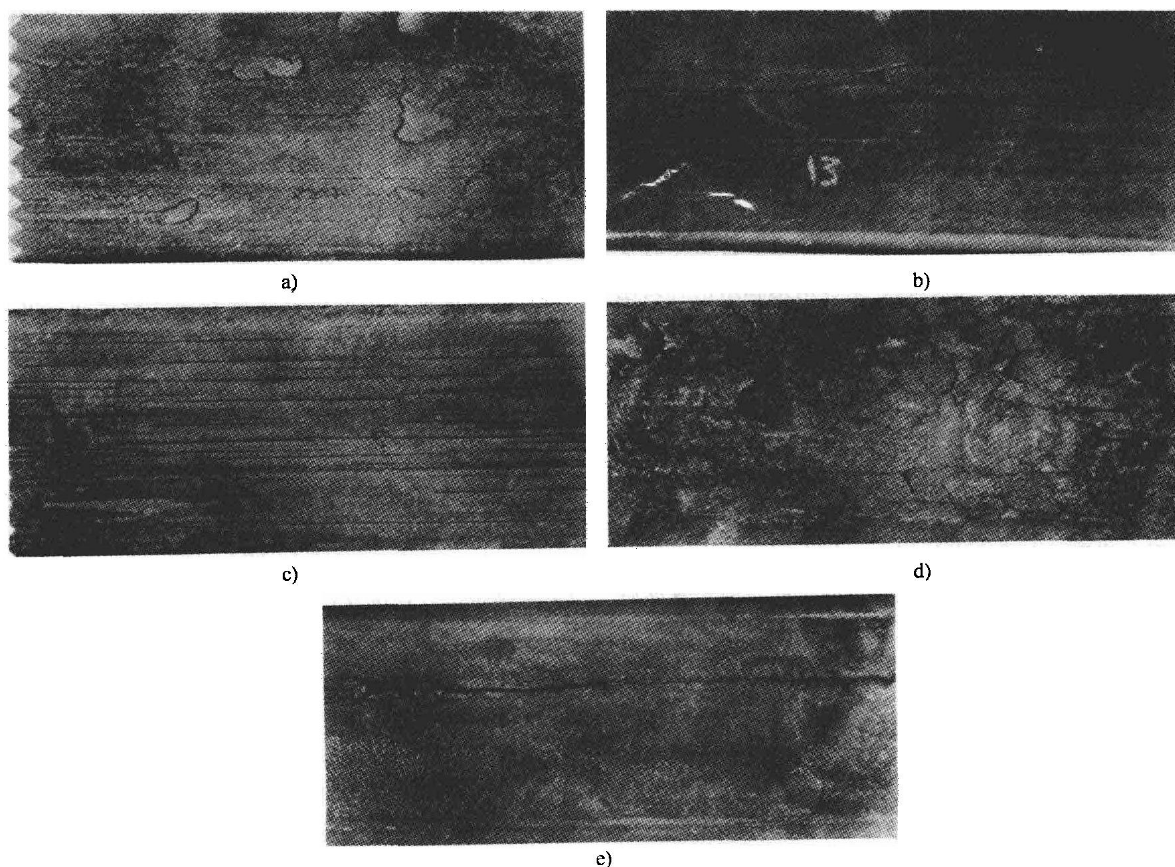
目前大尺寸的钢锭能以更高的生产率进行生产，对于较小截面的方坯用初轧机直接进行轧制显得有些困难。于是把方坯轧机和棒料轧机安排在初轧坯轧机之后，以此将初轧坯轧制成为较小的截面，而无需再加热。如果轧制一些温度范围比较窄的特殊牌号钢，则必须要有再加热设施。三辊方坯轧机使用与三辊初轧坯轧机相同的原理进行工作。利用轧辊在水平方向不同的部分沿着轧辊的长度方向通过多道沟槽成功地压缩其横截面。故一台三辊方坯轧机可以生产出几种尺寸的方坯。横穿式方坯轧机是由几台轧机组成的，这些轧机安排成轧坯在轧制的同一时间里决不会在一台以上的轧机里存在。这些轧机并排布置，而轧坯则通过机械手和导轨沿着轧辊工作台进行移动。经过一台或多台的轧机轧制后，在其相邻工作台上的轧制方向是相反的。每一台的速度都可以单独控制，故精轧可以用较快的速度进行轧制。在一条连续方坯轧制线上，轧机是一台连着一台。初轧坯从第一台进入而从最后一台出来，每一台上只经轧制一次。每一台顺序轧机的轧制速度都按照轧钢件从前一台轧机出来所增加的长度进行调整。这些轧制线上有些轧机可以是立式的，或就此简单地使用立辊轧机。这种轧制线有较高的产出率，因为其废品损耗较低。

从初轧机出来的产品在进入方坯轧机以前，得先用初轧坯头剪切机截去冒口(漏斗管)。固定的剪切机用于将大横截面的方坯剪断到尺寸，而游动的剪切机用于当方坯在连续运行中移动时剪断较小的横

截面。

半成品的修整

在“主要铸造缺陷”小节里所描述的钢锭缺陷以及另外一些在加热和轧制过程中所产生的缺陷是贯穿在整个初轧过程中的，并且出现在半成品的表面上，要求在进行精轧以前将这些缺陷都去除。图2.2-22所示的表面缺陷就是源于钢锭缺陷或在加热和轧制过程中生成的。氧化皮结疤缺陷指的是钢锭底部的结疤，钢锭上的这些结疤是在均热炉的炉底粘结而成的。钢锭放置在均热炉里，故氧化皮结疤仅产生在钢锭的冒口端部上，在轧制后可将其切除。由于均热时火焰直接燃着钢锭的棱角而造成钢锭的烧伤，因此在初轧时，避免使轧钢件发生诸如撕裂或崩碎一类的无法挽回的损坏。一次轧制而生成的毛刺或凸起会在下一次的轧制中被弯曲和轧扁，于是在半成品的表面形成叠疤。深层的叠疤是很难修复的。有多种无损检测的方法可以用于检查材料缺陷，并确定可修整的要求。通常并不是所有的缺陷都必须去除，这要取决于其用途或者所处理的钢的牌号。铣床和錾凿机可用于去除初轧坯和扁坯的表面缺陷。轧钢厂使用气刨即氧焊气炬将表面层去除。氧气把钢的表面快速氧化并形成高温，以此使氧化物变成液体。气刨可以采用手工操作或机械操作。打磨也是去除表面缺陷的常用方法。



a) b) c) d) e)

图2.2-22 由初轧钢锭制得的半成品表面缺陷

a）初轧坯的疤疵表面 b）形成钢锭裂纹的深度接缝 c）成束的接缝 d）破损的初轧钢坯 e）在钢的轧制品上的叠皮

由于半成品是在远高于钢的临界温度下进行轧制的，于是在轧制后的冷却过程中，它必定要通过其转变的温度范围。根据所轧制的牌号钢的尺寸和化学成分有必要控制半成品的冷却速率，以阻止其形成白点及内部微裂纹，并将热应力的产生降低到最低限度。白点通常产生在离轧钢件头部一段距离的地方，常位于从表面到截面中心的一半的位置上。白点一般是由于氢气溶入钢液造成的，让轧制温度适当地延迟冷却，就可以有效地防止发生剥落。在实行控冷作业之前，把轧钢件埋入砂子或灰里，以此延迟冷却过程，这也有助于最大限度地减少内应力的增大并降低硬度。比较新的控冷工艺包括自动控制炉，它可以在预设的温度范围里按规定的时间周期使轧钢件缓慢冷却。当采用快速冷却的冷却控制时，冷却的周期比较

短，而且有可能使轧钢件维持所要求的温度。当钢不处于热敏感范围内时，钢就能进行空气冷却。通过适当地应用牌号钢特定的等温转变图就可以制定这种冷却规范(参考文献[51])。一般来说，对于碳素钢和低合金钢，用较高的温度保温，然后空气冷却；而对于高合金深度硬化钢，可以用比较低的温度保温，然后将其再加热到恰好在临界温度范围以下。

精轧

在一根钢锭轧制成为半成品的型材(初轧坯、方坯、扁坯和圆坯)之后，它就同属于连续浇铸的产品。修整和控冷更适用于钢锭产品，因为在连续浇铸中如果产品在凝固过程中不直接进行精轧的话，也采用控冷。还有，连续浇铸制品的表面缺陷是很少的。除此以外，无论热、冷或两者兼之加工，钢总要通过塑性变形才能达到所要求的成品型材。轧制之后，必要的话还要进行热处理才能得到所要求的显微组织。应用分离型的轧钢线生产出常规的成品型材：厚钢板、薄钢板、带钢、圆钢、型钢、管材、线材、盘条，以及从中型到重型的轮、轴、轨、梁、槽钢和角钢。其他还有一些专用轧机用于锻、压或轧制各种非标的型材。在世界各地，这些轧机有不同的能力、外形及其结构。精轧的功能就是利用机械力对金属作永久的变形，以获得规定的形状并经过改善达到一定的性能。在热变形加工中，使金属产生变形的力对加载的速度和温度变化是非常敏感的，但是变形后金属的强度基本不会改变。在冷变形加工中，使金属产生变形的力对加载的速度和温度变化是相对敏感的，但是变形后金属的强度基本都会改变。除了轧制外，还能进行锻打、冲压、挤压、冲裁、镦粗和拉拔等方式的热、冷变形加工。在精轧中，轧机的数量和类型取决于轧制的形状和每轧制一次压缩百分比与轧制温度之间的关系。有些精轧机具有将产品卷起来的设施，如带钢轧机和线材轧机。一些厚钢板、薄钢板和管材轧机常有通过酸洗对表面的外表缺陷和氧化皮进行清除，以及进行防腐涂层的设施。轧制混凝土用钢筋的轧机还有为提高强度而将钢条冷拧的设施。一些加强型的型钢上的筋条是用轧辊上专门设计的沟槽轧制出来。

直接轧制。这是指很少或不再加热而直接对连续浇铸的产品进行精轧。其产品从连铸机出来经过再加热炉直接进入精轧机，如带钢热轧机，以此节省了浇铸后产品所保存的热量。其优质的表面质量是非常重要的，因为大范围地进行修整是不可能的。精轧中的再加热是在分批或连续型的处理炉里进行的。

连续带钢热轧

“带钢轧机”一词指的是一种连续轧制薄钢板或带钢的轧机。在现代宽带钢的热轧机中，扁坯要经历两次或更多次的连续再加热。一条典型的轧机线由一台粗破鳞机，四台四辊粗轧机、一台精破鳞机和六台四辊精轧机组成。近来有些装备配置里除了两台破鳞机外，使用了五台粗轧机和七台精轧机。驱动工作台的辊轮将材料从炉里输送进入轧制，并从一台进入另一台轧机。当轧件从轧机里处理出来转入一个称为输出辊道的长工作台时，用水或通过窄缝喷嘴喷洒在带钢的上、下表面，以此将带钢温度降低到一个受控的温度值上。在输出辊道的出口端装有两台或更多的卷带机。与中央工作台相平行的还安装有一些辅助工作台，并附有一些将材料移送到上面的机构。

如前所述，热轧配置利用连续的粗轧机组和精轧机组形成了非常高的轧制能力和快速移送，并几乎不需要热量损耗。然而它需要高额的设备成本和一定数量的轧制，而且当要变换轧制产品的尺寸时，为了快速改变轧机的设置需要为其柔性生产付出一些费用。另一种安排是使用可逆粗轧机和连续精轧机的生产线，这种配置具有较低的设备成本，并且在适用的轧制次数方面具有一定的柔性。如果扁坯的轧制是直接来自于初始的初轧工序，并利用所保留的热量进行带钢的轧制(直接轧制)，扁坯的再加热就可以省去。

成品带钢的质量方面包括扁坯的均匀加热，以便生产出均匀的氧化皮外层而利于轧制时去除。在再加热炉里的不适当保温会形成难以去除的氧化皮。其他要求满足产品标准的质量考量还有表面的均匀性、状态、规格尺寸、轧制宽度、精轧温度以及横截面形状。水的喷洒对于保持所要求的温度和维持无氧化皮表面起着关键的作用。应当指出的是，其冶金学的要求决定了一定的精轧温度。而这个温度还要受卷绕以前在该温度下的保持时间、除氧化皮喷洒的次数、精轧机组的轧制速度以及通风方法的影响。

卷绕

用带钢热轧机生产的宽热轧带钢卷可以在轧制条件下直接使用，而且可视情况进行酸洗、剪切、展平，即所谓的热轧薄钢板。如果用于冷轧压缩，这带钢卷要进行酸洗，最大冷轧压缩量达90%，还可以进行冷轧中间或之后的热处理。最后一台精轧机上的最后一次热轧工序应该在高于上临界的温度下进行。这样的处置可以使带钢在热变形加工结束之后经历一次相变，而且在整个带钢上都形成均匀细化的、等轴

的铁素体晶粒。对于低碳钢精轧的温度大约为845℃（1550℉）。如果部分热轧工序是在低于其临界温度下进行的，那么经变形的铁素体晶粒通常发会生再结晶；而且经常在650~730℃（1200到1345℉）范围内的卷绕会引起其自退火，然而此退火会造成局部的晶粒粗化。这种组织更可能出现在产品的表面，在轧制过程中带钢表面的温度比其内部更低。于是，在远低于上临界温度下轧制而成并含有轧制铁素体的非常薄的热轧带钢，由于其卷绕的温度过低而无法实现自退火，以至于会保留热变形加工留下的显微组织迹象。这种薄钢板或带钢就不适宜用于深拉或超深拉的用途，而有必要以后再进行一次正火的处理。

碳加上锰的合计含量（质量分数）低于0.1%的钢会在900~1035℃（1650~1900℉）的范围内会表现出热脆性。在这个温度下进行正常的热轧会在产品的边缘上产生很深的裂纹。为了避免出现这种情况，有些轧机就在热脆范围以上的温度里完成粗轧，使工件在从最后一次粗轧到精轧机组之间的输送工作台上进行冷却，以此通过这个温度范围，再在热脆温度范围以下进入精轧机组继续进行轧制。这个工艺将使精轧不会在上临界温度之上进行。

从最后一台轧机出来的输出辊道要有足够的长度，通过充分的冷却使工件的温度降低到350℃（630℉），即低于卷绕以前的精轧温度。在这个阶段所采用的冷却工艺在很大程度上决定了轧制成品的金属学性质。这个工艺也就是所谓的控轧和加速冷却过程。在卷绕以前的这个维持期间，形成一种具有特征性的碳化物形态和铁素体晶粒大小的均匀显微组织。如果钢板在大约730℃（1345℉）下卷绕，其自退火会生产出相当多不希望存在的团状碳化物、粗大的铁素体晶粒以及软的可延性薄钢板。在大约650℃（1200℉）下卷绕，则生产出一种有足够塑性并较硬的钢，其显微组织为细的球状碳化物，分散在更细的铁素体基体中。由于带钢卷在其边缘与中心和其外部与中部，有着不同的冷却速度，因此要使用风扇或喷洒水进行强制冷却，以此达到均匀的冷却。当要求得到马氏体或贝氏体的显微组织，甚至能在低于650℃（1200℉）的温度里进行卷绕（见“高强度低合金钢”小节）。

形变热处理

炼钢、钢包冶金/冶炼及连续浇铸工艺上的改进都是与成品在显微组织控制的理论和技术方面所取得的进步相适应的。正是在其工艺中的这种控制显微组织的能力使得钢的最终性能得到显著的改进，并获得相应的经济效益。控制过程的核心概念就是形变热处理。

现在已经有可能按照最终的用途要求生产轧制钢材，并使之具有量身定制最终性能。而量身定制最终性能的概念之所以成为可能，基本上是由于钢材的生产者具备一种以可预测的方式控制其最终显微组织的能力。这种对于最终显微组织的控制是基于对钢在热态工艺过程中的响应方式以及如何通过合金处理改变这种响应的认识（参考文献[52]）。

众所周知，最终显微组织的控制（即细化）是在凝固过程中开始的，并且在再加热、热轧及其最终的转变过程中继续进行。因为最终的显微组织的转变反映了转变前的奥氏体组织及其成分，所以很显然这种最终奥氏体的细化是获得最佳的最终显微组织及其性质的关键所在。用于得到合适的奥氏体组织的关键处理环节之一就是所说的形变热处理。正如下面所讨论的如今最普遍应用的形变热处理方式就叫做控轧。在控轧的过程中，受控的正是被轧制的奥氏体显微组织。

因为形变热处理的目的就是奥氏体晶粒组织的细化，在其处理过程中，对于再结晶和/或晶粒粗化的控制也属于可利用的冶金技术之列。微量元素如铌、钛和钒的存在，在形变热处理中显得特别有用，因为它们的碳化物/碳氮化物/氮化物在奥氏体中的溶解度是取决于温度。这些元素就是所谓的微量合金元素，因为它们的含量（质量分数）一般都在0.1%甚至更低。因此，利用这些微量合金元素能容易地达到形变热处理的目的，因为这些元素迫使再结晶延迟进行，并且在处理过程中受控析出能制约晶粒的粗化。因此在讨论形变热处理时提到微合金化钢是很正常的。图2.2-23所示是精轧压缩对于铁素体晶粒大小的细化作用，并以此使微合金化钢的韧性得到改善。

控轧。热轧工艺已逐渐变成一种较为严密的控制运行，目前控轧正越来越多地应用于其成分经仔细筛选的微合金化钢，以期得到在室温下的最佳力学性能。控轧作为一种工艺流程，其轧制各个阶段的温度都是受控制的，每一次轧制都按预定的压缩量进行，而且终轧温度也是精确设定的。用这种工艺所生产的钢材具有可靠力学性能，并广泛应用于输送管道、桥梁、海上平台及其他许多工程用途上。控轧的应用改善强度和韧性的结合，并进一步降低经过微合金化的高强度低合金钢（HSLA）的含碳量。这种含碳量的减少不仅可以提高韧性，而且改善了焊接性能。

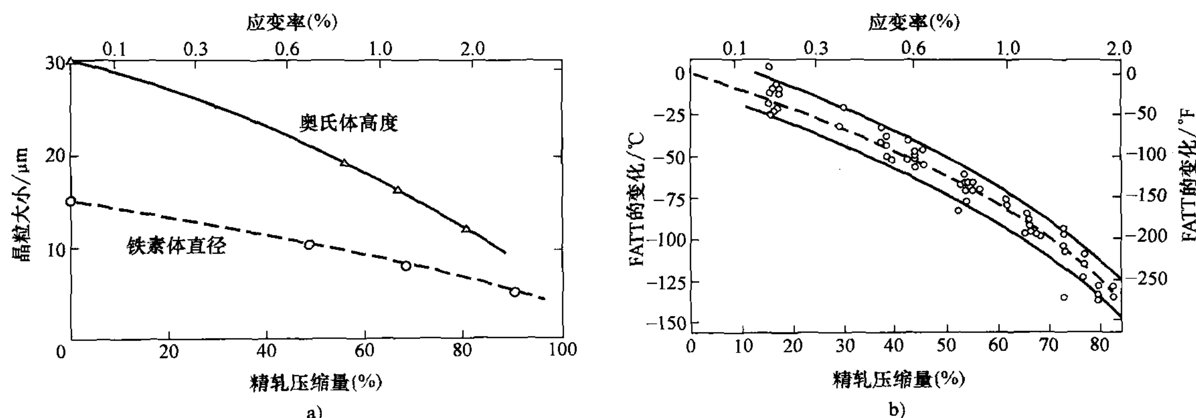


图 2.2-23　精轧压缩量的影响

a) 对于奥氏体和铁素体晶粒大小　b) 对于一般种类的微量合金钢的断裂韧度(断裂形态的转变温度或 FATT)

如前所述，控轧的主要目的就是通过在轧制过程中奥氏体晶粒的细化和/或变形，使得能在冷却过程中产生细的铁素体晶粒。控轧可以用于碳素钢，但是最有裨益的还是应用于添加了钒和铌的钢。在热轧过程中，不溶的钒和铌的碳氮化物钉轧住奥氏体晶粒的边界，以此延迟奥氏体晶粒的长大。然而碳素钢热轧所采用的温度也会导致奥氏体的明显增长，这就基本上体现不出通过控轧使晶粒细化的好处来了。控轧可以用于带钢、厚板和型材的轧机上，但不能用于带钢的连续热轧机。在带钢热轧机上，输出辊道的水冷却可以保证晶粒的细化。控轧的方法有以下三种：

- 传统的控轧
- 再结晶控轧
- 动态再结晶控轧

这三种方法用的是不同的晶粒细化技术，但是在它们之前采用的是利用反复再结晶的一种使晶粒细化的粗轧工序。在粗轧阶段需要稳定碳氮化物的析出物，因为它们能钉轧在结晶奥氏体的晶粒边界上以阻碍其长大。在轧制过程中，铌能比钒更有效地阻碍奥氏体晶粒的长大，因为由铌形成的析出物比碳化钒更不易在奥氏体中溶解。粗轧能生成大小数量级为20μm 的奥氏体晶粒。然后奥氏体晶粒在精轧过程中通过控轧被变形或进一步细化。

传统控轧。这种方法是以奥氏体晶粒的变形或压扁(扁平化)为基础，大量的形核位置存在于变了形的奥氏体晶粒边界上和含有奥氏体晶粒的变形带上。这些形核位置使得在传递冷却的过程中形成非常细的铁素体晶粒。这个过程要求在奥氏体变形的温度范围里产生高达80%的总压缩量而不发生再结晶。

在传统的控轧方法中，铌是最有效的晶粒细化合金化元素。在温度低于1040℃(1900℉)的轧制压缩过程中，溶解了的铌会通过溶质拖拽或在形变奥氏体和滑移平面上因应变产生的Nb(C、N)析出，而遏制再结晶的发生。而这种因应变产生的析出因为太大而无法影响沉淀的增强，但是也因以下两个原因而带来益处：它们通过防止奥氏体晶粒亚晶界的移动另行遏制再结晶的发生，以及它们在冷却过程中和在形变奥氏体中为细铁素体颗粒的生成提供了大量的晶核。在奥氏体中，因应变产生的析出物通过从奥氏体固溶体中除去尚存的铌来降低铁素体的析出硬化能力。不仅如此，还有可能成为控轧铌钢的一种析出强化的有用方法。

铌钢的控轧将使铁素体晶粒大小介于5~10μm(ASTM 的晶粒度10~12)。因为在热轧过程中，奥氏体中Nb(C、N)的析出能延迟再结晶的发生和提高停止奥氏体再结晶的温度(即再结晶的停止温度)，从而可能有较大的钢热变形加工温度范围，以便产生严重变形的奥氏体。为遏制两次轧制间的再结晶，铌的最佳含量(质量分数)可以低至0.02%。钛、锆和钒都不如铌那样有效地提高再结晶的停止温度。在凝固过程中和扁锭冷却中形成的氮化钛和氮化锆，当再度加热到热轧温度时，都不易溶解。虽然这些氮化物在再加热中能防止晶粒的粗化，但是它们并不能有效地防止再结晶，因为在热轧过程中的轧制温度下，固溶体里没有留下充足的钛和锆，以供其在变形的奥氏体晶界上析出，并遏制奥氏体的再结晶。另一方面，钒是很可溶的，故也就不容易在常规的热轧温度下析出。铌、钛、钒、碳和氮的浓度，应变的程度，两次轧制的间隔时间，应变率，以及形变的温度都会影响在热变形加工的过程中发生再结晶。

再结晶控轧。尽管传统的控轧能得到很细的铁素体晶粒，但是这种方法所用较低的精轧温度（750～900℃，1400～1650℉）会增大重型厚板和厚壁无缝钢管的轧制负荷。对于较厚截面，再结晶控轧用于奥氏体晶粒大小细化。这种工艺可以得到大小数量级为8～10μm 的铁素体晶粒。

再结晶控轧就是在低于粗轧的持续较低温度，却仍高于900℃（1650℉）的温度下的奥氏体再结晶。再结晶不该因为用此方法而受到延缓，所以钒的促进作用就在于碳化钒在轧制温度下容易溶解，故不会遏制再结晶的进行。然而钒钢要求稳定的碳氮化物，如氮化钛可延迟再结晶后的晶粒长大。另一方面，铌钢能在较高的温度下承受再结晶控轧，并最终形成 Nb（C、N）的析出物。而 Nb（C、N）的析出将制约奥氏体晶粒的长大，还可以免除添加钛的必要。

动态再结晶控轧。将其应用于当轧制道次间隔没有足够的时间进行再结晶。这种工艺在变形的过程中起始再结晶并要求有相当的压缩量（例如100%），以得到数量级为10μm 的奥氏体晶粒大小。借助于低温精轧动态再结晶控轧能得到数量级达3～6μm 的铁素体晶粒大小。

加速冷却。通过临界间的低温轧制，并结合以加速冷却通过其转变温度范围可以生产得到高强度、可控的产品。快速冷却还可以为随后的铁素体析出强化保留一些溶质。如果能实现细奥氏体的转变，就可以得到有足够强度和韧性、细的多边体形铁素体-珠光体或针状铁素体-细贝氏体。所以加速冷却必须与控轧相结合，因为粗奥氏体能转变为上贝氏体，并由此显著降低其韧性。由于加速冷却可以使淬硬剂（如钼和硼）和微合金添加剂均得到有效的发挥，从而可以将更精益的、更经济的低碳当量钢用于要求较高强度、韧性和焊接性的用途里。

斯太尔摩（Stelmor）工艺是在生产线材和圆钢的连续轧制机组中应用的另一种加速控冷方法。在一种用于生产加强型型材的斯太尔摩轧机线上，圆钢产品以非常高的速度通过一个有水喷洒的箱体，使钢的表面得到淬火并形成马氏体。然而当将线材置于卷取筒里时，发自产品心部的内热使马氏体回火而形成一种复合组织。硬回火表面具有强度以及合适的表面和表皮特性，而心部则以明显的铁素体-珠光体组织保持韧性。如此一种复合产品更适宜作为加强型型材而不需要进行冷扭合。

酸洗

当钢材需要进一步加工时，带钢、薄板、平板或半成品的表面上是不允许有氧化皮的。如镀锌、镀锡或涂漆薄钢板和带钢要进行冷轧或涂层，将其表面的氧化物去除是特别重要的。在拉拔工艺里，氧化皮的去除更是保证光滑的精加工表面和保护拉模不受氧化物的磨损所必不可少的。表面氧化皮主要是在热轧中生成的氧化铁。这种氧化皮的性质取决于温度和气氛环境。去除氧化皮的普通方法包括喷丸处理的物理方法和酸洗的化学方法。酸洗就是用无机酸的水溶液，如硫酸或盐酸将表面的氧化物和氧化皮通过化学反应除去。酸洗的设备有从槽型到全连续型的各种类型。

酸洗中酸与金属的化学反应产生硫酸盐或盐酸盐及氢气。当氧化皮与酸发生反应时，产生的是水而不是氢。镍、铬和铜能延迟铁或氧化皮的溶解，因为含有这些元素的氧化皮会阻碍酸的侵蚀。硅和铝本身也会形成耐熔的氧化物，并降低氧化皮的溶解速度。铁比氧化皮更容易受酸的侵蚀。以更高阶氧化物的形式含有铁的氧化皮较难以发生反应。酸洗的速度还取决于氧化皮的粘着性。溶液的温度和浓度、硫酸铁的浓度、搅拌、浸没的时间以及防蚀剂的存在都会影响酸蚀的速度。温度比浓度具有更为明显的影响。一般酸洗槽保持在65～80℃（150～175℉）的温度，其速度通过调节浓度来控制。这种方法对于加热和保持防蚀剂的稳定性有利于节省燃料。由酸洗量所要求的槽液浓度可在很大的范围里变化。连续型酸洗槽液通常要求更强的酸洗能力和保持较高的温度，因为其酸洗的时间比较短。硫酸槽液的酸浓度范围为12%～25%，而盐酸的则为5%～50%。硫酸铁的形成对于酸洗的速度有阻碍作用，故最高只能允许其达到25%。但是更高的氯化铁含量倒是允许的。槽液可以使用到其游离酸的浓度下降至5%。搅拌工件或液体是节省时间、酸和金属损耗的常用方法。其他酸洗槽添加剂包括防蚀剂、润湿剂、光亮剂等。防蚀剂用于降低金属的溶解速度，强化对氧化皮的腐蚀并防止槽里起泡沫。好的防蚀剂应该是以较小的浓度、便宜而且有效，而且能产生无应变、清洁的金属表面。润湿剂起到降低槽液与金属之间的表面张力作用。光亮剂，顾名思义就是使赋予表面以光亮和平滑。

盐酸酸洗提供一种更快和更清洁的酸洗，而且酸消耗较少以及酸洗废液使用较少。由于用较低的温度，故蒸汽的消耗量也降低近40%。在可比较的温度和用酸浓度条件下，盐酸酸洗与硫酸酸洗比，要快2.5～3.5倍。盐酸还能更有效地去除镶嵌在表面的金属和氧化皮颗粒。一般硫酸和盐酸的消耗率分别是介于每吨钢的15～22.5kg 和5～7kg 之间。盐酸酸洗液能为氧化皮的破碎提供更大的适用性，高速酸洗通

常并不要求回火轧制，硫酸酸洗线才有必要回火轧制。经酸洗的表面在进入下一步工序前一般要清洗和沥干。经酸洗处理的表面有更好的连接性和粘结性，如用于镀锌、涂层或油漆等用途（参考文献[53]）。

特种工艺路线

超低碳素钢

影响碳素钢的主要因素就是碳的含量和显微组织。锰是一种固溶体的强化剂。除了碳、锰、硅、磷和硫外，碳素钢的性能还能通过其他残余元素的影响而得到改善，它们通常都来自于熔剂、脱氧剂和炉子的耐火材料。此外，正如前面已提到过的，气体氢、氮和氧也能影响钢的性能。在钢的冶炼过程中，控制这些外加剂料很重要。为此，在过去二十年里，钢厂曾采用过一些非常复杂的工艺技术。因为碳是为钢提供强度的主要元素，w(C)低于0.05%，且w(Mn)在0.20%左右，对于具有高冷态成形性的钢是必要的。这种钢应用于要求深拉性或超深拉性，以及需延伸成形的用途中，尤其是在汽车工业上。伴随高度均匀的延伸，塑性应变比(r)和应变硬化指数(n)是关键的参数（参考文献[54]）。图2.2-24所示是碳对于一些重要力学性能的影响，而这些性能反映了高成形性。

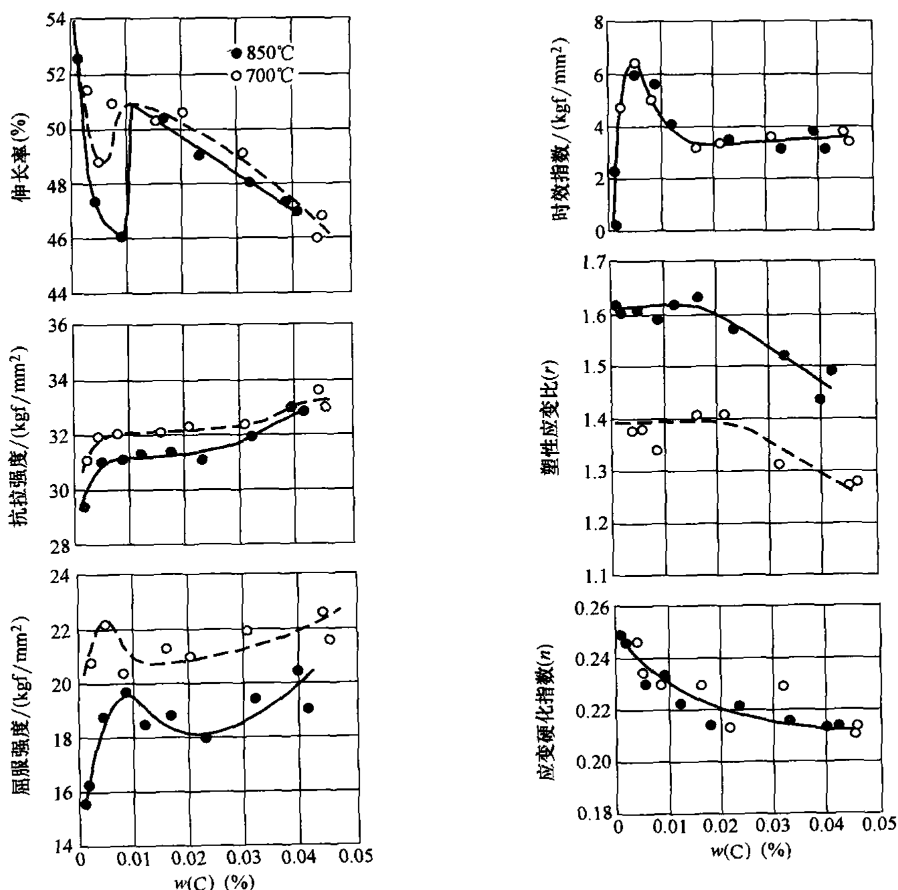


图2.2-24　含碳量对钢的力学性能的影响（注：1kgf = 9.806N）

图2.2-25所示是用于超低碳钢的一种典型工艺路线。这是一种含铝的全镇静钢，在二次冶炼中通过铌或钛的处理，碳和氮被降低到0.001%以下。随后钢能被浇铸成钢锭或进行连续浇铸。在超过1200℃（2190℉）的保温中，将氮化铝加入熔体里，然后在低于560℃（1040℉）的温度下卷绕以遏制氮化铝的析出是处理中的关键步骤。高温卷绕会在紧密的绕卷里降低其冷却速度，并造成氮化物的析出。厚度很薄的热卷材料经过连续的冷轧和退火可以得到优良的晶体组织。在退火中，氮化铝的析出会形成{111}的晶体组织，并造成铁素体晶粒的长大。通过分别保持铝和氮的含量（质量分数）在0.025%～0.04%和0.005%～

0.01%之间能够得到最高的应变比值。避免高温退火温度（>730℃，或1350℉）是为了防止发生碳化物的粗化和卷叠的粘结。在退火中，调节冷却温度是为了在固溶体中保留一些碳，以此提高超低碳素钢的薄板和带钢的强度。对于 w(C)为0.02%以下的含碳量较低的低碳钢材料可以采用连续退火，而批量退火能够用于处理 w(C)高达0.05%的碳素钢（参考文献[55]）。

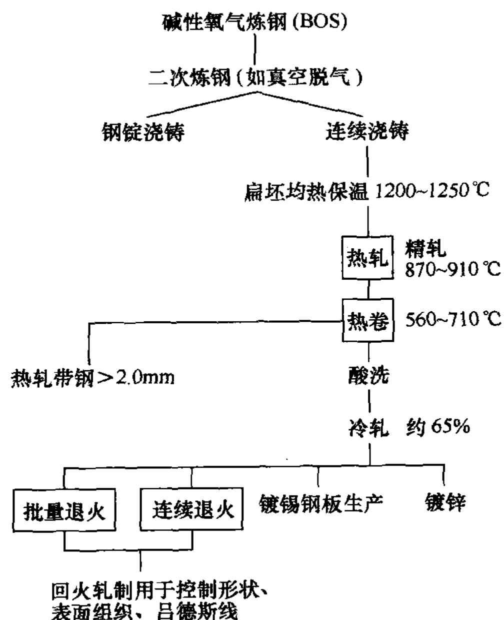


图2.2-25　典型的低碳带钢制造工艺流程图

无间隙固溶原子钢

w(C)低于0.003%和 w(Mn)低于0.18%的平轧钢属于无间隙固溶原子钢，并特别强调的是其低含氮是防止时效效应，低含氢是防止表面剥落。在二次炼钢中，通过铌、钛和硼的处理可以降低碳和氮的含量。在这种钢中，硼与氮之比为0.8:1.0，是十分有利的，因为硼比铝有更大的与氮的亲和力，因此有相对较高的卷绕温度，在这种钢中，碳化钛可提高其再结晶的温度，从而钢能在950℃（1740℉）以上的温度下精轧。无间隙固溶原子钢是以大于2.0的高应变比值为其特征的，这时可以通过连续退火取得优良的成形性。少量的磷（回磷钢：高达0.1%P）、锰和硅有时也用于给无间隙固溶原子钢增加一些强度，即所谓的高强度无间隙固溶原子钢（IF-HSS）。这些钢既保持其成形性又无损于其焊接性能（参考文献[56]）。

高强度低合金钢

无间隙固溶原子钢和超低碳素钢都因其低含碳量和含锰量而强度较低（抗拉强度约低于300MPa或40ksi），均不适宜高强度的应用，这些牌号钢特别应用于高成形性。然而，良好的焊接性和成形性对于同时具有热轧和冷轧状态的高强度板材产品来说是极具意义的。由于既要减轻重量又要保持高强度（屈服强度为410~550MPa，或60~80ksi是很普遍的）和结构刚性的薄钢板的需求，而导致微量合金的钢种[即高强度低合金钢（HSLA）]的开发。一些普通的HSLA牌号钢的抗拉强度最低也能达到480MPa（70ksi）。一种或多种的少量合金添加剂，如钒、铌、钛、硼、铬、硅、氮和/或铜，都是在钢包脱氧或在二次炼钢的过程中加入钢液里，以达到以下一个或多个目的（参考文献[57]）：

- 析出强化
- 固溶强化
- 铁素体晶粒细化
- 相变强化

此外，在一些特定的用途里，HSLA钢还要求有耐腐蚀性、极佳的焊接性以及高室温和低温的缺口韧性值。在参考文献[58]中介绍了上述每一种添加元素的特定作用。应该强调指出的是，对于汽车、管道和耐腐蚀产品都要求降低硫的含量（参考文献[59]）。图2.2-26清楚地说明了非常少量的微量合金元素的添加对于HSLA钢性能的影响。作为HSLA牌号钢，一种好的脱氧方法是必不可少的，只有这样才能取得合金添加的高利用率。这些钢的生产可用于平轧薄板、带钢和厚板以及一些结构型材，如管道管材、气体容器钢、增强型棒材、冷镦钢等。

超高强度钢

通过高铬、钼、镍、钒和锰合金添加量结合低碳钢，或通过低至高的合金添加量结合中至高的碳钢（w(C)>0.40%）开发了若干具有超高强度（抗拉强度超过1000MPa或145ksi）的工程用钢。前一类的高合金低碳钢用于汽轮机叶片、垫圈、螺栓和箱体，而后一类低中至高的碳基钢是为了满足高强度轨道钢、轴承钢、锻造钢、工具钢、高速钢及高碳盘条的需求。这类钢所要求的重要性能是高室温和高温淬硬性（通过硬度或表面硬度），并伴有高韧性。

借助于真空脱气技术和夹杂物形状的控制，这种超高强度钢的质量有了明显的改进。在浇铸或铸造的过程中，应用液流的氩气遮蔽可防止再度氧化，并减少非金属夹杂物的含量，而真空感应熔化和真空电弧熔化则是生产特别纯净钢的最常用工艺（参考文献[60]）。无渣出钢、钢包搅拌和高氧化铝钢包炉衬的

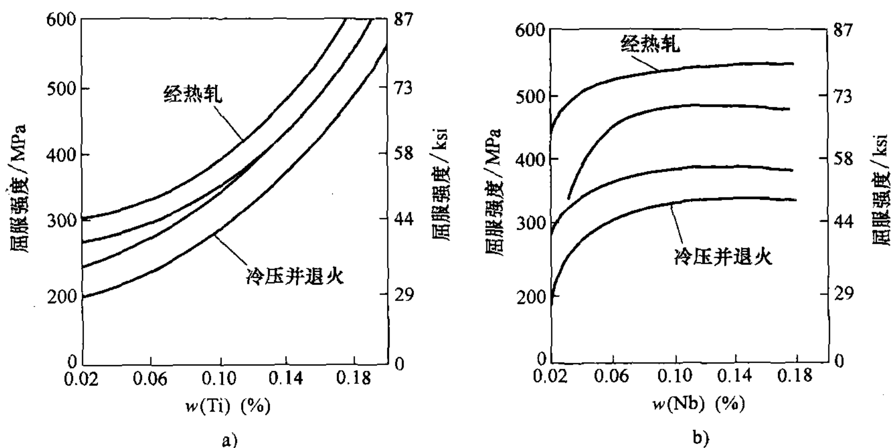


图2.2-26 微合金化处理对热-冷轧带钢的影响

使用都是生产纯净钢的一整套措施中不可或缺的。通过铅、硒、碲、钙、铋或稀土元素的添加可以实现夹杂物形状的控制。可以像HSLA钢一样，将铌、钒或钛作为微量添加剂加入，以此对类似的性能进行强化。低硫的石油焦炭通常用作增加含碳量的原料。近来碳化铁的商品化提供了一种更好的钢液碳化原料，这是由于它具有的低搭配元素含量和比石油焦炭更高的密度。

冷轧产品

冷轧成品包括扁材、冷轧带钢和薄钢板、无镀层厚钢板，它们都是用碳素钢和合金钢包括不锈钢加工得到。回火、退火和齐边轧制都是与冷轧配合使用的工序。工艺流程的选择是完全由其应用决定的。冷轧的意思也就是让未经加热的金属通过轧制使其厚度减薄，表面粗糙度降低和控制其力学性能。用于冷轧的金属一般都是成卷状的，而且是由带钢热轧机生产的。在冷轧之前，热轧卷要进行开卷、酸洗、干燥、涂油和再卷。卷料以非常高的速度进行压制，并从一个卷到另一个卷地回转进行。在单台可逆或连轧机上的大压缩量可高达90%。冷轧工艺的设计是以轧机的类型、可供功率大小、钢材的宽度、总压缩量、钢的硬度和抗拉强度、润滑及所要求的表面粗糙度为基础依据的。在多台轧机机组或可逆轧机上最后一次轧制，主要用于控制所规定的厚度、平整度和表面粗糙度，而不在于压缩量(参考文献[61])。

根据用途的需要，有时是为了利用经冷轧的材料在其轧制条件下所形成的冷作高强度。一般而言，金属需要通过热处理来控制其力学性能。在热处理之前还要经过化学、电化学或机械的表面清洁工序。低碳、深拉钢通常还要在箱式炉里或接近675℃(1250℉)的低温连续炉里进行退火，促其应力消除和再结晶并防止任何晶粒长大。冷轧压缩以后还可以进行其他种类的热处理，如在不锈带钢中溶解碳化铬，或在用于变压器的硅钢薄板上形成一种惰性氧化物。

紧接着还有必要进行硬化冷轧(或表面光轧——译者注)以使产品达到一定的特性，例如抑制能形成吕德斯线(Lüder line)(参考文献[62])的屈服点延伸、光亮的表面和表面平整度及形状的改善。通常，硬化冷轧的压缩量要限制在2%以内，以免其塑性降低。冷轧产品的硬化冷轧后还可进行剪切、修边、纵切和校正。

接缝、裂纹作为冷轧产品的主要表面缺陷起源于钢液浇铸过程中所进入的夹杂物。当钢材的厚度被大大压缩时，非金属夹杂物就会出现在表面并且剥落出来。此外，为了形成一种良好的组织结构，在冷轧产品里还要求有一种临界的铝-镍平衡。于是，就能容易显示作为冷轧材料关键因素的脱氧、夹杂物控制和氮平衡。氩气冲洗后使用宽端朝上的锭模，而且在惰性气体完全遮蔽下浇铸的全铝镇静钢具有能用于冷轧钢用途上的增强的力学和表面性能。

不锈钢

结合低含碳量的铁-铬钢，可能还要加入镍和钼，被命名为不锈钢；这时 w(Cr)至少要为12%才能在表面形成一层氧化铬的惰性层。这个惰性层在不锈钢里起到防腐蚀的作用。在氧气冶炼出现之前，不锈钢是在小电弧炉(EAF)里用废料、镍和铬铁合金炼制而成的。炼制不锈钢的现代技术是基于一种两步法的工艺。第一步是用一般的EAF快速熔化废料和铁合金，但是用便宜的高碳铬铁合金作为其铬的主要来源。因为不锈钢的冶炼要使用较多的废料熔化和合金化及较

少的冶炼，因此采用 EAF 由于有外部能源的输入而胜过用以氧气为主的转炉工艺。在 EAF 里熔化了的高碳钢，然后进入第二步，利用 AOD 或通过氧吹的 VOD(见本章“钢二次冶炼”一节)进行冶炼。目前，全世界用 AOD 工艺生产的不锈钢按吨数超过 80%。在 AOD 中使用特殊的脱硫炉渣，利用氩气搅拌可以得到搅拌均匀的金属-炉渣混料。氧气能将钢液脱碳到 0.01%C(质量分数)以下及氢含量在 2 ~ 3ppm 之间。奥氏体不锈钢中导致晶间腐蚀的敏感性显著受到诸如硫化物或其他夹杂物第二相颗粒团簇拉长的影响。在一些铌基的不锈钢牌号里，氮的存在会引起碳氮化物的生成，也会因此给敏感性带来有害的影响。故在不锈钢的冶炼中，控制气相夹杂物和硫的存在是很重要的。

不锈钢要求昂贵的铬、镍和钼的合金添加。因此这些元素的利用率需要特别注意。按硅或铝的化学计量，有效减少炉渣可以使大部分金属元素的总体利用率达 97%~100%。铬的利用率平均约为 97.5% 而镍和钼的利用率约为 100%。通常用连铸机的浇铸有较高的生产率，尽管不锈钢使用钢锭浇铸和初轧仍然比碳素钢更为普遍。铬铁合金的生产成本直接影响不锈钢的价格。

工业用的各种不同不锈钢都是按照奥氏体(可加工硬化)、铁素体(可加工硬化)、奥氏体-铁素体(双重的)或马氏体(热处理硬化)进行分类的。虽然这种分类是根据显微组织做出的，但是它关系到合金添加的两个主要作用：①控制高温显微组织的奥氏体(N、C、Ni、Co、Cu 和 Mn)生成物与铁素体生成物(W、Si、Mo、Cr、V 和 Al)之间的平衡；②在室温下控制马氏体转变温度范围 *Ms-Mf* 和马氏体转变程度的总体合金含量。图 2.2-27(参考文献[63])所示是生成铁素体和生成奥氏体的合金添加对于所生产的不锈钢种类的影响。

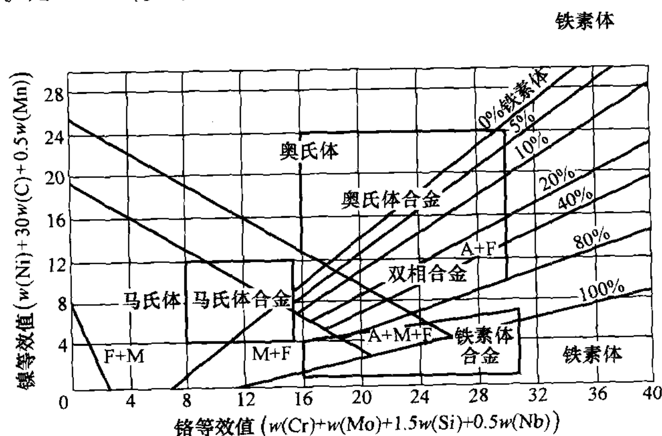


图 2.2-27　不锈钢的改进型斯盖埃弗勒组成图，铁素体、马氏体、奥氏体和双相合金的成分都叠加在该图上

低于 815℃(1500℉)时，不锈钢的导热性比碳素钢和合金钢的都要低，所以对于在 815℃(1500℉)以下的加热要特别注意避免表面烧伤。此外，不锈钢的热变形加工温度范围也比碳素钢小，故在保温和轧制过程中要求更好的温度控制。马氏体牌号钢在轧制后要缓慢冷却或退火，因为它们会空气淬火。铁素体牌号钢要精轧到较低的温度，以防止造成撕裂和裂纹的晶粒长大。奥氏体牌号钢要求更大的轧机功率，因为其强度大于铁素体牌号钢，而且对晶粒的长大也较为敏感。由于镍的存在，对于奥氏体牌号钢在再加热炉内气氛中的硫进行控制是很重要的。在轧制过程中，液态的硫化镍在晶界上的形成将会导致撕裂和裂纹。不锈钢的冷轧有两个目的——减小热轧的厚度和经冷成形为零件。除了高碳牌号钢以外，所有的不锈钢都适合冷变形加工。热轧之后应进行酸洗。

钢液的分析技术

不能过分强调钢的性质主要都由其化学成分决定，而且一旦金属被浇铸，炼钢人员就无法控制其成分。利用现代方法进行钢的初炼和二次冶炼过程的计算机化处理及因此所需的时间也大大缩短了，这对于液态金属允许的分析时间提出了非常高的要求。化学分析人员必须快速反馈钢液的化学成分分析结果，以致必要时可及时采取纠正措施。遗憾的是适用的快速和精确分析还是十分有限的。

用化学分析测定材料的成分是否在规定的化学极限值之内，有时还要检验钢中所含的元素发生偏析的程度。碳、硅、硫、磷和锰的元素分析必须与氧气和氮气的测定以及温度的监测同时进行。通常，使用高温计或浸入式热电偶精确测量温度。一般都用自耗式氧气传感器进行氧气总量的在线分析。然而用发射光谱法可进行合金元素浓度的快速测定。

发射光谱能定量和定性地测定主要的和微量的元素组成。处于能量激发环境里的各种游离原子会按一系列窄的波长区段发光。这些区段或发射光的线条构成一种图形或发射光谱，而光谱反映所发光的各种原子的特征。发射光线条的强度是与产生这些线条的数量呈正比的。样品中，每一种元素的存在都表示成为由发自激发源的光所展示的一条或多条的特征性线条。而元素的浓度可以通过测量线条的强度予以确定(参考文献

[64])。发射光谱的特征构成了元素定性分析的依据，而发射光线的强度则构成了元素定量分析的依据。

在精炼期间，从浇铸前的炼钢炉里或在二次冶炼过程中，从钢包里采集钢液样品。样品立即浇铸成适用于光谱仪分析的样式。在分析前，其作用表面还要进行一些表面磨削。利用一个发射光源将样品分解成原子蒸汽，然后以足够的效能激发其蒸汽，使之产生可供测量的发射信号。有四种可供使用的发射光源：电弧光、高压放电、辉光放电和火焰。每一种发射光源都有一套物理特性，及其相应的分析能力和局限性。

高压放电和辉光放电是在炼钢过程中进行成分快速分析应用最为普遍的发射光源。高压放电光源的激发是分析合金样品最快的方法，其分析时间短到仅30s，通常只需几分钟就能完成。火焰光源适用于分析碱金属的微量级含量低至仅数 ppm，而辉光光源更适合于碳、磷和硫的分析，其检测极限(质量分数)最低达到 0.002% S 和 0.014% C。

适用于钢的化学成分分析的其他分析技术包括原子吸收光谱、X 射线荧光以及感耦和直流等离子发射光谱。其中一些技术要求样品能溶解在溶剂中。硫和磷的定性分析还可以用硫印和磷印法进行，但这些方法都不能用于快速分析。

参考文献

[1] H.M. Boylston, *An Introduction to the Metallurgy of Iron & Steel*, John Wiley & Sons, 1936, p 3–31.

[2] H.H. Campbell, *The Manufacture and Properties of Iron & Steel*, Hill Publishing Company, 1907, p 2–24.

[3] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, US Steel Publication, 1984, p 1–24.

[4] A. Chatterjee and P.V.T. Rao, Ed., *Monograph on Coal & Coke at Tata Steel*, Tata Steel Publication, 1992, p 69–97.

[5] P. Reichardt, *Arch. F.D. Eisenhuttenw*, Vol 1, 1927/1928, p 77–101.

[6] L. von Bogdandy and H.J. Engell, *The Reaction of Iron Oxides*, Springer-Verlag, 1971.

[7] E.T. Turkdogan, Ironmaking Proceedings, AIME, Vol 31, 1972, p 438–458.

[8] G.D. Elliot and J.A. Bond, *Practical Ironmaking*, The United Steel Companies, Ltd., Sheffield, UK, 1959, p 97–106.

[9] C. Bodsworth and H.B. Bell, *Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture*, Longman Group, Ltd., 1972, p 161–188.

[10] A.R. Kay and J. Taylor, *JISI*, 1963, Vol 201, p 68.

[11] G. Smith and J. Taylor, *JISI*, Vol 202, 1964, p 577.

[12] J.C. D'Entremont and J. Chipman, *J. Phys. Chem.*, 1963, Vol 67, p 499.

[13] J. Taylor, *JISI*, Vol 202, 1964, p 420.

[14] K.P. Abraham, M.W. Davies, and F.D. Richardson, *JISI*, Vol 196, 1960, p 309.

[15] H.P. Shulz, *Stahl Eisen*, Vol 89, 1969, p 249.

[16] A.A. El-Geassy, K.A. Shehata, and S.Y. Ezz, *Trans. ISIJ*, Vol 17 (No. 11), 1977.

[17] A. Chatterjee, *Beyond the Blast Furnace*, CRC Press, 1994, p 19–179.

[18] F.M. Stefens, Jr., and W.E.J. Williams, *Steel Tech. Intl.*, 1992.

[19] B. Deo and R. Boom, *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*, Prentice Hall, 1993, p 146–187.

[20] H.W. Kreutzer, *Stahl Eisen*, Vol 92, 1972, p 716–724.

[21] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, US Steel Publication, 1984, p 627–669.

[22] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, US Steel Publication, 1984, p 42–96.

[23] E.T. Turkdogan, Reaction of Liquid Steel with Slag During Furnace Tapping, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol 15, 1988, p 311–317.

[24] K.W. Lange, Thermodynamic and Kinetic Aspects of Secondary Steelmaking Processes, *Intl. Mater. Rev.*, Vol 33, 1988, p 53–89.

[25] T.H. Bieniosek, B.S. Kupchik, and K.C. Ahlborg, Ladle Slag Deoxidation with Aluminum-Limestone Mixtures, *Steelmaking Conf. Proc.*, ISS-AIME, Vol 72, 1980, p 409–411.

[26] H.E. Wiemer, H.M. Delhey, M. Sperl, and R.A. Weber, *Stahl Eisen*, Vol 105, 1985, p 1142–1148.

[27] H.P. Haastert, *Thyssen Tech. Ber.*, Vol 1, 1983, p 1–14.

[28] B. Deo, Models for Predicting Sulfur and Phosphorus Distribution Ratios in Oxygen Steelmaking, *Trans. IIM*, Vol 41, 1988, p 475–479.

[29] L.E.K. Holappa, Ladle Injection Metallurgy, *Int. Mater. Rev.*, Vol 27, 1982, p 53–76.

[30] E.T. Turkdogan, Physicochemical Aspects of Reactions in Ironmaking and Steelmaking Processes, *Trans ISIJ*, Vol 24, 1984, p 591–611.

[31] F.D. Richardson, *Physical Chemistry of Melts in Metallurgy*, Vol 2, Academic Press, 1974.

[32] A. Bergman, The Application of Optical Basicity to Dephosphorization Equilibria, *Steel Res.*, Vol 61, 1990, p 347–352.

[33] H. Ono, et al., Removal of Phosphorus from LD Converter Slag by Floating Separation of Dicalcium Silicate During Solidification, *Trans ISIJ*, Vol 21, 1981, p 135–144.

[34] K.H. Karl, H. Abratis, H. Maas, and M. Wahlster, Reaktionen Sauerstoffasffiner Begleitelemente des Eisens mit Eisenoxidhaltigen Basischen Schacken, *Arch. Eisenhuttenwes.*, Vol 45, 1974, p 9–16.

[35] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10th ed., US Steel Publication, 1984, p 664–669.

[36] W.T. Lankford, Jr., et al. Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 691–696.

[37] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 697–701.

[38] M.C. Flemings, *Solidification Processing*, McGraw Hill, 1974.

[39] M. Burden and J. Hunt, A Mechanism for the Columnar

to Equiaxed Transition in Castings and Ingots, *Met. Trans.*, Vol 6A, 1975.

[40] H. Jacobi, "Casting and Solidification of Steel," CEC Steel Research Report EUR 5861, 1978, p 94.

[41] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 741–771.

[42] L.J. Heaslip and A. McLean, 'Tundish Metallurgy'—Considerations Pertaining to Tundish Performance and Metallurgical Treatment During Continuous Casting, *Continuous Casting*, Vol 1, *Chemical and Physical Interactions During Transfer Operations*, ISS of AIME, 1984, p 93–98.

[43] I.V. Samarasekera and J.K. Brimacombe, The Continuous Casting Mould, *Continuous Casting*, Vol 2, *Heat Flow, Solidification and Crack Formation*, ISS of AIME, 1984, p 33–44.

[44] B.N. Bhat and N.T. Mills, Development of Continuous Casting Mold Powders, *Continuous Casting*, Vol 1, *Chemical and Physical Interactions During Transfer Operations*, ISS of AIME, 1984, p 147–154.

[45] J.K. Brimacombe, et al., Spray Cooling in the Continuous Casting of Steel, *Continuous Casting*, Vol 2, *Heat Flow, Solidification and Crack Formation*, ISS of AIME, 1984, p 109–124.

[46] T. Kohno, et al., Improvement of Surface Cracks by Air-Water Mist Cooling in Strand Casting, *Continuous Casting*, Vol 2, *Heat Flow, Solidification and Crack Formation*, ISS of AIME, 1984, p 133–138.

[47] N.A. Shah and J.J. Moore, A Review of the Effects of Electromagnetic Stirring (EMS) in Continuously Cast Steels, *Continuous Casting*, Vol 3, *The Application of Electromagnetic Stirring (EMS) in the Continuous Casting of Steel*, ISS of AIME, 1984, p 35–46.

[48] W.R. Irving, *Continuous Casting of Steel*, The Institute of Materials Publication, London, UK, 1993.

[49] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 782–785.

[50] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 730–740.

[51] *Isothermal Transformation Diagrams*, 3rd ed., United States Steel Corporation, Pittsburgh, PA, 1963.

[52] A.J. DeArdo, G.A. Ratz, and P.J. Wray, *Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite*, TMS-AIME, 1982.

[53] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 1083–1086.

[54] D.T. Llewellyn, Low Carbon Strip Steels, *Steels: Metallurgy & Applications*, Butterworth Heinemann, 1992.

[55] N. Takahashi, et al., Proc. Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel, B.L. Bramfitt and P.L. Manganon, Ed., *TMS-AIME*, 1982, p 133.

[56] P.J.P. Bordignon, K. Hulka, and B.L. Jones, "High Strength Steels for Automotive Applications," Niobium Technical Report NbTR-06/84, 1984.

[57] M. Cohen and S.S. Hansen, *Proc. HSLA Steels: Metallurgy and Applications* (Beijing), J.M. Gray, T. Ko, S. Zhang, B. Wu, and X. Xie, Ed., American Society for Metals, 1985.

[58] F.B. Pickering, *Physical Metallurgy and the Design of Steels*, Applied Science Publishers, 1978.

[59] J.W. Kochera, *Proc. of the Low Sulfur Steels Symposium, Workshop II: Oil Country Steels*, Amax Matls. Res. Center, 1984, p 41–57.

[60] "Vacuum Degassing of Steel," Special Report No. 92, The Iron and Steel Institute, 1965.

[61] W.T. Lankford, Jr., et al., Ed., *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10th ed., United States Steel Publication, 1985, p 1102–1168.

[62] W.L. Roberts, *The Cold Rolling of Steel*, Marcel-Dekker, Inc., 1978.

[63] H. Schneider, *Foundry Trade J.*, Vol 108, 1960, p 562.

[64] P.B. Farnsworth, Optical Emission Spectroscopy, *Metals Handbook*, Vol 10, *Materials Characterization*, 9th ed., American Society for Metals, 1986, p 21–30.

第3章　碳素钢和合金钢

本章内容由《ASM 手册》，第1卷性能与选用：铁、钢及高性能合金钢，1990，105～822页的内容精简而成。补充内容引自《ASM 特种手册：碳素钢与合金钢》，1996 和《ASM 手册》，第19卷疲劳与断裂，1996。

第1节　碳素钢和合金钢的分类和代号

本节所讨论的碳素钢与合金钢的锻轧制品的合金元素总含量(质量分数)不超过5%。用粉末冶金方法压制或生产的铁素材料，工具钢、合金含量更高的不锈钢以及主要以其电磁性能而应用的钢材(如硅钢)均在本手册另有专述。

重要用语及定义

分类。就是在其某种共性特征的基础上，将钢材系统性地归类或划分成组。钢材分类的基础为：①成分，如碳素钢和合金钢；②生产方法，如碱性氧吹转炉钢和电弧炉钢；③成品的加工方法，如热轧或冷轧薄钢板；④显微组织，如铁素体或马氏体；⑤所要求的强度等级，如 ASTM 所规定的标准；⑥热处理，如退火或淬火加回火；⑦特性表述，如锻造特性或结构特性；⑧产品形态，如棒材、厚钢板、薄钢板、带钢、管材或结构型材。在钢铁工业里，以产品形态分类是非常普遍的，因为制造商要根据产品形态的识别确定其生产所需要的轧制设备以及规划这些设施的使用。

实际应用还会进一步细分这些广义的分类。例如，碳素钢常粗略地分类为低碳钢(w(C)在0.30%以下)、中碳钢(w(C)为0.30%～0.60%)或高碳钢(w(C)为0.60%～1.00%)。它们还可以按其生产中所采用的脱氧工艺分为沸腾钢、压盖沸腾钢、半镇静钢或镇静钢。合金钢则常根据其所含的主要(一种或数种)合金元素进行分类。为此如镍钢、铬钢、铬-钒钢等。实际使用中，还有其他分类系统，其名称都是不言而喻的。

牌号(grade)、**型号**(type)**和等级**(class)。这些都是钢材产品的分类用语。在钢铁工业里它们都有特定的用法：牌号用于指化学成分，型号用于指其脱氧工艺，而等级指其他的属性，例如强度等级或表面粗糙度。

然而根据 ASTM 技术标准，上述用语的使用会有些互换。例如在 ASTM A 533 里型号指的是化学成分，而等级表示强度级别。在 ASTM A 515 里牌号指的是强度级别，由这种技术规范所规定的最高含碳量取决于板的厚度和强度级别。在 ASTM A 302，其牌号同时包含了化学成分和力学性能的要求。ASTM A 514 和 A 517 为分别应用于结构和压力容器用途的高强度厚钢板的技术规范，每一种都含有能满足所要求力学性能的几种成分。A 514 型号 F 具有与 A 517 牌号 F 相一致的成分极限。

代号。就是用数字、字母、符号、名字或其适当的组合代表每一种牌号、型号或等级的特定钢种。化学成分是至今最为广泛应用的代号依据，其次为力学性能指标。在美国应用最广的代号系统为国际 SAE(过去称汽车工程师学会)和美国钢铁协会(AISI)。统一编号系统(UNS)也用得越来越多。后面将逐一阐述各代号系统。

特性。钢铁工业在产品描述中用“特性”的意思是使轧制品尤其适合于特定用途或其后续加工工序的一些特殊性质，然而它并不一定意味着：该轧制品就是一种较好的材料，或是由较好的原材料制造得到的，或比其他轧制产品制造得更为精细。

技术规范。这是一种钢材为满足特定用途所必须具有的并以书面表示的特性，这些特性还取决于制造和工艺方面的需要以及工程和应用方面的要求。一般它包括钢材经检验必须符合的一系列代表不同特性的参数值，而且可能还包括会对其指定用途不利的一些其他特征的限定。

标准技术规范。是一种公开发表的文件，它在较大的应用范围里对产品合格性进行描述，而且许多制造商都能够按其规定进行生产。即使没有能对为特定用途而生产的钢材产品要求特性进行全面描述的标准技术规范，最好也能援引最为适用的标准技术规范以及对于特定用途必须排除的特性参数。由此，为能得到个性化产品，制造商和用户都要熟悉标准技术规范。

在采购钢材（或其他任何产品）时，将技术规范列入采购协议书里对于采购是非常有用的。技术规范能准确地说明产品必须具有何种特性。仅仅根据名称进行采购，则说明采购者只是指定了其名称中所表述的特性，并且允许供应商以其自己的常用方法制造产品。技术规范和标准工艺之间的差别将如下所述。

特性标记

制造商之间以及制造商与用户之间的沟通需要一套所谓基本特性标记的术语现已形成，这些用于表示各种不同的钢材产品的名称代表了具有一定特征的特定产品，从而使产品特别适合于特定的用途或制造工艺。表2.3-1所示是常用的基本特性标记。

表2.3-1中的有些特性标记，如锻件特性或冷拉特性都能顾名思义。而另一些的意思就不那么明了，例如商用特性的热轧碳素钢棒材用于仅要求中等强度和轻度弯曲或成形的非关键用途，并不要求进行锻造或热处理。作为一种特定的钢材品种标记，并非必须纳入将其进一步加工成的下一层次产品里，例如标准冷精轧棒材就是用特种性能的热轧棒材加工得到。

表2.3-1　碳素钢和合金钢的特性描述

碳素钢			
半成品锻件 锻造特性 特殊的淬硬性 特殊的内部致密性 非金属夹杂物要求 特殊表面	**冷精轧碳素钢棒材** 标准特性 特殊的淬硬性 特殊的内部致密性 非金属夹杂物要求 特殊表面 冷镦和冷锻特性 冷挤压特性	**镀锌薄钢板** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 闭合成形特性	**碳素钢扁钢丝** 缝纫用钢丝 钉书钉用钢丝
碳素钢的结构型材 结构特性	**热轧薄钢板** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 结构特性	**电解镀锌薄钢板** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 结构特性	**碳素钢钢管** **结构用管材** **管线用材** **油用管件**
碳素钢厚钢板 常规特性 结构特性 冷冲压特性 冷压制特性 冷折边特性 锻造特性 压力容器特性	**冷轧薄钢板** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 结构特性	**热轧带钢** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 结构特性 **冷轧带钢** 冷轧带中没有特定的特性描述，因为这类产品大多为特定的终端用途而生产的	**特种钢管制品** 压力管材 机制管材 飞机用管材
热轧碳素钢棒材 商用特性 特殊特性 特殊的淬硬性 特殊的内部致密性 非金属夹杂物要求 特殊表面 净成形螺母用特性 驱动轴特性 冷挤压特性 冷镦和冷锻特性	**搪瓷薄钢板** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 **镀锡（铅）长薄钢板** 商用特性 冲压特性 特殊轧压量的冲压特性 结构特性	**白铁皮轧制品** 不适用特定的特性描述 **碳素钢钢丝** 工业特性钢丝 冷挤压钢丝 镦、锻和轧-螺纹钢丝 机制弹簧钢丝 坐垫弹簧结构钢丝 焊丝	**热轧碳素钢盘条** 工业特性 用于制造电焊链条的圆钢 用于镦、锻和轧-螺纹钢丝的圆钢 用于锁紧垫圈钢丝的圆钢 用于净成形螺母钢丝的圆钢 用于坐垫弹簧钢丝的圆钢 用于焊丝的圆钢

（续）

合 金 钢	
合金钢厚钢板 冲压特性 压力容器特性 结构特性 飞机用物理特性	**冷精轧合金钢棒材** 常规特性 飞机用特性或需经磁粉检测的钢材 驱动轴特性 轴承用特性 冷镦特性 特殊冷镦特性 来复管、枪械、防弹外壳或装甲用特性
热轧合金钢棒材 常规特性 飞机用特性或需经磁粉检测的钢材 驱动轴用特性 轴承用特性 冷镦特性 特殊冷镦特性 来复管、枪械、防弹外壳或装甲用特性	**管线用材** **油用管件** **特种钢管制品** 压力管材 机制管材 不锈钢和耐压头管道、压力管材和机制管材 飞机用管材 管道
合金钢线材 飞机用特性 轴承用特性 特殊表面特性	

由一个特性标记所包含的各种力学和物理特性都产生于以下多种因素的综合效果：①内部的致密程度；②化学成分的相对一致性；③抵御产生表面缺陷的能力；④钢锭剪切废料头的大小；⑤制造过程中的批量试验；⑥非金属夹杂物的数量、大小和分布；⑦淬硬性要求。上述因素的控制对于轧制产品获得所要求的特征来说是必要的。对于不同相关因素的控制程度也可用特性标记来表达。

基本标记中的一部分但不是全部可以通过一个或多个附加要求进行适当的改进，例如特殊料头、宏观浸蚀试验、化学成分的限量、非主要（残留）合金的最大含量、特殊的淬硬性或奥氏体晶粒大小。这些限定可以应用于锻造特性的合金钢材棒，但不可用于商用特性棒材。

由于确认一种钢材的特定标记的大部分要求都带有主观性，所以对于各种不同的特性标记的理解也是很复杂的。只能对非金属夹杂物数量、化学成分范围及辅助合金元素的限量、奥氏体晶粒大小和特殊的淬硬性给予量化的表示。而对于其余特征的主观评估则要取决于评估者的技能和经验，虽然这些带有主观性的特性标记似乎不太精确和难以应用，但是按照一定的特性标记的要求所生产的钢材产品还是具有一些能满足所标明的用途或制造工艺所必需的特征。

技术规范

技术规范是产品在技术上或商业上必须满足的，并以书面形式表述的技术要求，它也是一种控制采购的文件。不同的组织机构所制定的技术规范的形式也是五花八门的，但是任何一份合理、适用的技术规范，都应提供如下信息：

- 专业范畴，以此涵盖产品的型号（必要时包括规格范围）、条件，以及对于无论供应商还是用户来说都是有用的有关产品工艺评价的说明。可以用专业名称并加上一定形式的说明，以此代替某一范围条款。
- 化学成分，应予以详细说明，或将其化学成分以易于识别的代号方式标明。SAE-AISI 就是常用的代号方式。
- 特性说明，它包括任何适当的特性标记及任何必要的附加要求，还可以包括钢的型号及其所允许的炼制工艺。
- 定量要求，以此确定成分以及为确保材料特征所必要的力学性能允许值范围。还应包括测定这些性能所使用的测试方法，至少也要参照标准试验方法。为经济起见，可以将这部分仅限于与指定应用密切相关的那些性能。
- 附加要求，它包括特殊公差、表面处理、作为压延产品的边缘修整，以及特殊标识、包装和装运

说明。

由工程学会、协会或科研院所颁布的，并由其成员单位生产、认证和采购的钢材产品的标准技术规范中的很多颇为有名并享有很高的声誉。下面列出一些重要技术规范编写制订的组织。从中的一些名称可以清楚地看出由专业组织机构编写的技术规范也只是局限于其自身所属的专业范围。

组 织 机 构	缩写
美国铁路协会	AAE
美国造船局	ABS
美国石油学会	API
美国铁道工程协会	AREA
美国机械工程师学会	ASME
美国材料试验学会	ASTM
汽车工程师学会	SAE
航天材料技术规范编委(属汽车工程师学会 SAE)	AMS

其中，由 ASTM 所颁布的技术规范最为全面，并得到了广泛的应用。与钢材产品相关的技术规范有三个不同的级别。ASTM A6 包括大部分碳素结构钢产品的一般性要求。例如，ASTM A 588 含有 A6 的一般要求，并且还阐述了作为高强度低合金钢(HSLA)更为特定的要求。如适用于合金弹簧钢丝的 A 231 的一些技术规范指的是应用于具体用途上的特定产品。

其他一些钢材产品的技术规范是由不同的公司和美国政府机构为满足自已的特殊需要而编写的，它们主要用于那些公司或机构的采购，除此渠道它们的传播和使用都很有限。

在技术规范与标准工艺之间有一个重要的差别。如上所述，技术规范对于产品是必须满足的要求的一种表述。当它被采购者举证或为供应商采纳时，它就成为采购协议的一部分。许多钢材轧制品的制造商都会公开出版其标准制造工艺的汇集。其刊载的数据包括了外界所希望要的尺寸、公差及一些性质，而这些特定要求在别处是查不到的。《AISI 钢材产品手册》就是集碳素钢和合金钢的 AISI 牌号、许多钢铁厂商的标准工艺，以及已向学会报告的有关学术和技术方面信息的汇编。AISI 认为其钢材产品手册并不是技术规范，而是一本汇集许多钢材轧制产品制造商皆可接受的规范和公差的好指南。为了最大限度地降低由于订购“非标”钢材产品而引起的附加成本，这些手册所包含的商业公差和工艺在任何时候都有可能被汇集成为技术规范。

化学分析

化学成分常被用作钢材分类或为其按标准代号进行命名的依据。以此确定的牌号也就常被收集入钢材产品的技术规范里。作为钢材产品的使用者和鉴别人应该熟悉其采样和分析方法。

钢材的分析通常采用湿化学分析法或光谱分析法进行。湿分析是测定少数试件或以机加工切屑为试样的最常用成分分析方法。光谱分析非常适用于大批量试件的化学成分的常规测定，可以说是在轧钢生产条件下所必不可少的。传统的湿化学和光谱两种分析方法都在《ASM 手册》，第 10 卷金属特性中有详细阐述。

熔炼和产品分析。在冶炼过程中从钢包或炼钢炉里采集少量的熔化金属，使其凝固，再分析其合金含量。在大部分的钢厂里都是用光谱法进行这些熔炼分析的，可以同时测定出多达 14 种的不同元素成分。然而熔炼分析仅仅为客户提供由相应牌号或技术规范所规定的那些元素的最高或最低极值含量。

熔炼分析结果一般可认为是其全部熔化金属成分的精确表达。钢材的生产商已经发现通过碳素钢和合金钢的熔炼分析，可以将特定合金元素含量稳定地控制在由钢材、产品类型和冶炼方法规定的范围之内。这些范围已经作为批量生产工艺而公布，然后被纳入标准技术规范。表 2.3-2 ~ 表 2.3-5 列出了用于碳素钢和合金钢熔炼分析的标准范围和极限值。

表 2.3-2　碳素钢的浇铸或熔炼化学成分含量极限及其范围

元素	所指元素的最高含量(质量分数,%)	范围(质量分数,%)	元素	所指元素的最高含量(质量分数,%)	范围(质量分数,%)
碳①	≤0.12	—	碳①	>0.55 ~0.8 含	0.10
	>0.12 ~0.25 含	0.05		>0.80	0.13
	>0.25 ~0.40 含	0.06	锰	≤0.40	0.15
	>0.40 ~0.55 含	0.07		>0.40 ~0.50 含	0.20

（续）

元素	所指元素的最高含量（质量分数，%）	范围（质量分数，%）	元素	所指元素的最高含量（质量分数，%）	范围（质量分数，%）
锰	>0.50～1.65含	0.30	硅（用于棒材）②③	≤0.15	0.08
磷	>0.40～0.08含	0.03		>0.15～0.20含	0.10
	>0.08～0.13含	0.05		>0.20～0.30含	0.15
硫	>0.050～0.09含	0.03		>0.30～0.60含	0.20
	>0.09～0.15含	0.05	铜	如需含铜，则通常用的最小含量为0.20	
	>0.15～0.23含	0.07	铅④	如需含铅，则通常用的范围为0.15～0.35	
	>0.23～0.35含	0.09			

注：本表仅适用于锻件半成品、热轧和冷精轧的棒材、盘条和无缝钢管管材。

含：指包括。经硼处理的细晶粒钢，按w(B)为0.0005%～0.003%生产。

①所示的含碳量范围通常仅适用于其w(Mn)最高不超过1.10%。当w(Mn)最高超过1.10%，通常在所示的含碳量范围上再加上0.01%。 ②作为普通的工艺，不会用含硅量为所示极限值生产加磷和加硫的碳素钢，因为会对其切削性能产生不利影响。③当圆钢需含有硅时，通常用以下的范围和极限值（质量分数，%）：≤0.10；0.07～0.15，0.10～0.20，0.20～0.40或0.30～0.60。 ④铅仅规定范围（质量分数）为0.15%～0.35%的情况，因为它通常是在浇注时加入模子或钢包流液里。

表2.3-3 碳素钢的浇铸或熔炼化学成分含量极限及其范围

元素	所指元素的最高含量（质量分数，%）	范围（质量分数，%）	元素	所指元素的最高含量（质量分数，%）	范围（质量分数，%）
碳①②	≤0.15	0.05	磷	>0.08～0.15含	0.05
	>0.15～0.30含	0.06	硫	≤0.08	0.03
	>0.30～0.40含	0.07		>0.08～0.15含	0.05
	>0.40～0.60含	0.08		>0.15～0.23含	0.07
	>0.60～0.80含	0.11		>0.23～0.33含	0.10
	>0.80～1.35含	0.14	硅	≤0.15	0.08
锰	≤0.50	0.20		>0.15～0.30含	0.15
	>0.050～1.15含	0.30		>0.30～0.60含	0.30
	>1.15～1.65含	0.35	铜	如需含铜，则通常用的最小含量为0.20	
磷	≤0.08	0.03			

注：本表仅适用于结构用型材、厚钢板、带钢、薄钢板和焊接钢管管材。

含：指包括。

①所示的含碳量范围适用于其w(Mn)最高不超过1.00%。当w(Mn)最高超过1.00%时，在所示的含碳量范围上再加上0.01%。 ②w(C)最大值为0.12%的用于结构型材和厚钢板。

表2.3-4 合金钢熔炼成分范围和极限值

元素	所指元素的最高含量（质量分数，%）	范围（质量分数，%）		元素	所指元素的最高含量（质量分数，%）	范围（质量分数，%）	
		平炉或碱性氧吹炉钢	电炉钢			平炉或碱性氧吹炉钢	电炉钢
碳	≤0.55	0.05	0.05	碳	>0.70～0.80含	0.10	0.09
	>0.55～0.70含	0.08	0.07		>0.80～0.95含	0.12	0.11

（续）

元素	所指元素的最高含量(质量分数,%)	范围(质量分数,%)	
		平炉或碱性氧吹炉钢	电炉钢
碳	>0.95～1.35含	0.13	0.12
锰	≤0.60	0.20	0.15
	>0.60～0.90含	0.20	0.20
	>0.90～1.05含	0.25	0.25
	>1.05～1.90含	0.30	0.30
	>1.90～2.10含	0.40	0.35
硫①	≤0.050	0.015	0.015
	>0.050～0.07含	0.02	0.02
	>0.07～0.10含	0.04	0.04
	>0.10～0.14含	0.05	0.05
硅	≤0.15	0.08	0.08
	>0.15～0.20含	0.10	0.10
	>0.20～0.40含	0.15	0.15
	>0.40～0.60含	0.20	0.20
	>0.60～1.00含	0.30	0.30
	> 1.00～2.20含	0.40	0.35
铬	≤0.40	0.15	0.15
	>0.40～0.90含	0.20	0.20
	>0.90～1.05含	0.25	0.25
	>1.05～1.60含	0.30	0.30
	>1.60～1.75含	②	0.35
	>1.75～2.10含	②	0.40
	>2.10～3.99含	②	0.50
镍	≤0.50	0.20	0.20
	>0.50～1.50含	0.30	0.30
	>1.50～2.00含	0.35	0.35
	>2.00～3.00含	0.40	0.40
	>3.00～5.30含	0.50	0.50
	>5.30～10.00含	1.00	1.00
钼	≤0.10	0.05	0.05
	>0.10～0.20含	0.07	0.07

元素	所指元素的最高含量(质量分数,%)	范围(质量分数,%)	
		平炉或碱性氧吹炉钢	电炉钢
钼	>0.20～0.50含	0.10	0.10
	>0.50～0.80含	0.15	0.15
	>0.80～1.15含	0.20	0.20
钨	≤0.50	0.20	0.20
	>0.50～1.00含	0.30	0.30
钨	>1.00～2.00含	0.50	0.50
	>2.00～4.00含	0.60	0.60
铜	≤0.60	0.20	0.20
	>0.60～1.50含	0.30	0.30
	>1.50～2.00含	0.35	0.35
钒	≤0.25	0.05	0.05
	>0.25～0.50含	0.10	0.10
铝	≤0.10	0.05	0.05
	>0.10～0.20含	0.10	0.10
	>0.20～0.30含	0.15	0.15
	>0.30～0.80含	0.25	0.25
	>0.80～1.30含	0.35	0.35
	>1.30～1.80含	0.45	0.45

元素	炼钢工艺	最低极大值③(%)
磷	碱性平炉钢、碱性氧吹炉钢或碱性电炉钢	0.035④
	碱性电炉E钢	0.25
	酸性平炉钢或电炉钢	0.050
硫	碱性平炉钢、碱性氧吹炉钢或碱性电炉钢	0.040④
	碱性电炉E钢	0.25
	酸性平炉钢或电炉钢	0.050

注：适用于棒材、初轧坯、方坯和扁坯。

含：指包括。

①硫的含量范围通常表示加硫钢。 ②非正常生产的平炉钢。 ③不适用于加磷和加硫钢。 ④磷、硫的较低极大值是由一定的特性标记所要求的。

表 2.3-5　合金钢熔炼成分范围和极限值

元素	所指元素的最高含量（质量分数,%）	范围（质量分数,%）	
		平炉或碱性氧吹炉钢	电炉钢
碳	≤0.25	0.06	0.05
	>0.25~0.40 含	0.07	0.06
	>0.40~0.55 含	0.08	0.07
	>0.55~0.70 含	0.11	0.10
	>0.70	0.14	0.13
锰	≤0.45	0.20	0.15
	>0.45~0.80 含	0.25	0.20
	>0.80~1.15 含	0.30	0.25
	>1.15~1.70 含	0.35	0.30
	>1.70~2.10 含	0.40	0.35
硫	≤0.060	0.02	0.02
	>0.060~0.100 含	0.04	0.04
	>0.100~0.140 含	0.05	0.05
硅	≤0.15	0.08	0.08
	>0.15~0.20 含	0.10	0.10
	>0.20~0.40 含	0.15	0.15
	>0.40~0.60 含	0.20	0.20
	>0.60~1.00 含	0.30	0.30
	>1.00~2.20 含	0.40	0.35
铜	≤0.60	0.20	0.20
	>0.60~1.50 含	0.30	0.30
铜	>1.50~2.00 含	0.35	0.35
镍	≤0.50	0.20	0.20
	>0.50~1.50 含	0.30	0.30
	>1.50~2.00 含	0.35	0.35
	>2.00~3.00 含	0.40	0.40
	>3.00~5.30 含	0.50	0.50
	>5.30~10.00 含	1.00	1.00
铬	≤0.40	0.20	0.15
	>0.40~0.80 含	0.25	0.20
	>0.80~1.05 含	0.30	0.25
	>1.05~1.25 含	0.35	0.30
	>1.25~1.75 含	0.50	0.40
	>1.75~3.99 含	0.60	0.50
钼	≤0.10	0.05	0.05
	>0.10~0.20 含	0.07	0.07
	>0.20~0.50 含	0.10	0.10
	>0.50~0.80 含	0.15	0.15
	>0.80~1.15 含	0.20	0.20
钒	≤0.25	0.05	0.05
	>0.25~0.50 含	0.10	0.10

注：适用于厚钢板。

含：指包括。硼钢的 $w(B)$ 最少为 0.0005%。合金钢的生产会带有的 $w(Pb)$ 为 0.15%~0.35%。无法用熔炼分析法测定铅的含量，是因为铅是在钢锭浇铸时加入钢包的液流里的。

由于在钢锭的凝固过程中某些合金元素常发生偏析，因此它不同部位的局部成分与平均成分会稍有差异。许多不同长度的棒材坯料用同一钢锭轧制而成，所以可以预料不同单件棒材之间的成分会有所差异。故即使曾经过熔炼分析，但单件棒材的成分也可能与其适用规范不相符合。取之于一大炉次的单件棒材（或其他产品）的化学成分被称为成品分析或校验分析。作为成品分析的范围和极限值一般比相应熔炼分析的范围和极限值更宽、更不严格一些。表 2.3-6 ~ 表 2.3-8 列出了在标准生产工艺中所用的这种极限值。

表 2.3-6　碳素钢和合金钢的厚钢板、薄钢板、桩材和用于结构棒材的成品分析公差

元素	所指元素的上限或最大值（质量分数,%）	公差（质量分数,%）	
		低于最小极限值	高于最大极限值
碳	≤0.15	0.02	0.03
	>0.15~0.40 含	0.03	0.04
锰①	≤0.60	0.05	0.06
	>0.60~0.90 含	0.06	0.08

（续）

元素	所指元素的上限或最大值（质量分数,%）	公差（质量分数,%）	
		低于最小极限值	高于最大极限值
锰①	>0.90～1.20含	0.08	0.10
	>1.20～1.35含	0.09	0.11
	>1.35～1.65含	0.09	0.12
	>1.65～1.95含	0.11	0.14
	>1.95	0.12	0.16
磷	≤0.04	—	0.010
	>0.04～0.15含	—	②
硫	≤0.05	—	0.010
硅	≤0.30	0.02	0.03
	>0.30～0.40含	0.05	0.05
	>0.40～2.20含	0.06	0.06
镍	≤1.00	0.03	0.03
	>1.00～2.00含	0.05	0.05
铬	≤0.90	0.04	0.04
	>0.90～2.10含	0.06	0.06

元素	所指元素的上限或最大值（质量分数,%）	公差（质量分数,%）	
		低于最小极限值	高于最大极限值
钼	≤0.20	0.01	0.01
	>0.20～0.40含	0.03	0.03
	>0.40～1.15含	0.04	0.04
铜	0.20仅最小	0.02	—
	≤1.00	0.03	0.03
	>1.00～2.00含	0.05	0.05
钛	≤0.10	0.01③	0.01③
钒	≤0.10	0.01③	0.01③
	>0.10～0.25含	0.02	0.02
	仅规定的为最小	0.01	—
硼	任意	②	②
铌	≤0.10	0.01③	0.01③
锆	≤0.15	0.03	0.03
氮	≤0.030	0.005	0.005

含：指包括。

①棒材和小尺寸型材的锰产品分析公差（质量分数）：≤0.90、±0.03，>0.90～2.20含、±0.06。　②产品分析不适用。　③如最小的范围（质量分数）为0.01%，则下公差为0.005%。

表2.3-7　碳素钢和合金钢的棒材、初轧坯、方坯和扁坯的成品分析公差

元素	所指范围的极限值或最大值（质量分数,%）	最大极限值之上或最小极限值之下的公差（质量分数,%）			
		≤0.065m²（100in²）	>0.065～0.129m²（100～200in²）含	>0.129～0.258m²（200～400in²）含	>0.258～0.516m²（400～600in²）含
碳	≤0.25	0.02	0.03	0.04	0.05
	>0.25～0.55含	0.03	0.04	0.05	0.06
	>0.55	0.04	0.05	0.06	0.07
锰	≤0.90	0.03	0.04	0.06	0.07
	>0.90～1.65含	0.06	0.06	0.07	0.08
磷①	仅最大值以上，≤0.40	0.008	0.008	0.010	0.015
硫①	仅最大值以上，≤0.050	0.008	0.010	0.010	0.015
硅	≤0.35	0.02	0.02	0.03	0.04
	>0.35～0.60含	0.05	—	—	—
铜	仅最小值以下	0.02	0.03	—	—
铅②	0.15～0.35含	0.03	0.03	—	—

含：指包括。沸腾钢或压盖钢和硼不受限于产品分析公差。用于高强度合金钢的合金元素的产品分析公差按表2.3-8所列的规定。

①因为磷、硫的偏析程度，所以那些元素的产品分析公差不适用于加磷和加硫钢。　②对于所指定范围的以上和以下，产品分析都可适用于铅。

表2.3-8 合金钢的棒材、初轧坯、方坯和扁坯的成品分析公差

元素	所指定范围的极限值或最大值(质量分数,%)	按所示大小的最大极限值之上或最小极限值之下的公差(质量分数,%)			
		≤0.065m^2(100in^2)	>0.065~0.129m^2(100~200in^2)含	>0.129~0.258m^2(200~400in^2)含	>0.258~0.516m^2(400~600in^2)含
碳	≤0.30	0.01	0.02	0.03	0.04
	>0.30~0.75	0.02	0.03	0.04	0.05
	>0.75	0.03	0.04	0.05	0.06
锰	≤0.90	0.03	0.04	0.05	0.06
	>0.90~2.10含	0.04	0.05	0.06	0.07
磷	仅最大值以上	0.005	0.010	0.010	0.010
硫	仅最大值以上①	0.005	0.010	0.010	0.010
硅	≤0.40	0.02	0.02	0.03	0.04
	>0.40~2.20含	0.05	0.06	0.06	0.07
镍	≤1.00	0.03	0.03	0.03	0.03
	>1.00~2.00含	0.05	0.05	0.05	0.05
	>2.00~5.30含	0.07	0.07	0.07	0.07
	>5.30~10.00含	0.10	0.10	0.01	0.10
铬	≤0.90	0.03	0.04	0.04	0.05
	>0.90~2.10含	0.05	0.06	0.06	0.07
	>2.10~3.99含	0.10	0.10	0.12	0.14
钼	≤0.20	0.01	0.01	0.02	0.03
	>0.20~0.40含	0.02	0.03	0.03	0.04
	>0.40~1.15含	0.03	0.04	0.05	0.06
钒	≤0.10	0.01	0.01	0.01	0.01
	>0.10~0.25含	0.02	0.02	0.02	0.02
	>0.25~0.50含	0.03	0.03	0.03	0.03
	所指最小值，按最小值以下检验②	0.01	0.01	0.01	0.01
钨	≤1.00	0.04	0.05	0.05	0.06
	>1.00~4.00含	0.08	0.09	0.10	0.12
铝③	≤0.10	0.03	—	—	—
	>0.10~0.20含	0.04	—	—	—
	>0.20~0.30含	0.05	—	—	—
	>0.30~0.80含	0.07	—	—	—
	>0.80~1.80含	0.10	—	—	—
铅	0.15~0.35含	0.03④	—	—	—
铜	≤1.00	0.03	—	—	—
	>1.00~2.00含	0.05	—	—	—

（续）

元素	所指定范围的极限值或最大值（质量分数，%）	按所示大小的最大极限值之上或最小极限值之下的公差（质量分数，%）			
		≤0.065m^2（100in^2）	>0.065～0.129m^2（100～200in^2）含	>0.129～0.258m^2（200～400in^2）含	>0.258～0.516m^2（400～600in^2）含
钛	≤0.10	0.01②	—	—	—
铌	≤0.10	0.01②	—	—	—
锆	≤0.15	0.03	—	—	—
氮	≤0.030	0.005	—	—	—

含：指包括。硼不设产品分析公差。

①加硫钢不设对硫的产品分析极限值。　②如最小范围（质量分数）为0.01%，则下公差为0.005%。　③所示公差仅适用于0.065m^2（100in^2）或更小。　④公差为其以上或以下。

残留元素。残留元素常会从生产生铁用的原材料里或从炼钢时所用的废钢里进入钢材产品。一般都要通过严格的炼钢工艺将这些残留元素的含量控制在可以接受的水平上。硫和磷通常认为是有害于钢的性能，因此对于大部分牌号的钢都要给这些元素设置允许含量的限制值。硫、磷的含量在碳素钢和合金钢的分析中是一定要进行的，其他的残留合金元素对钢性质的影响比硫和磷的小，对于许多牌号钢的这类元素的限制要进行选择或者完全不予考虑。除了有特别原因，残留合金元素的含量无论对熔炼分析还是产品分析一般都不作规定。

钢的硅含量。许多钢材的成分要求，尤其是普通碳素钢对于硅的含量没有严格的限制。缺乏硅的含量要求并非疏忽，而是表明对于钢的含硅量常能直接从炼钢时所用的脱氧工艺上进行追溯的这一事实的认可。

沸腾钢和压盖钢不需要脱氧，其硅的存在只是从废钢或原材料里留下的残留量，一般w(Si)低于0.05%。技术规范和通常对于这种钢的订单都会按客户要求，说明这种钢必须是沸腾钢或压盖钢，故对其硅的含量一般不设限制。

在半镇静钢钢锭的凝固过程中，必须通过脱氧剂与钢液中氧的含量之间的匹配对沸腾作用的程度进行仔细的控制。因此，每一炉次脱氧所需硅的用量也会稍有变化。作为半镇静钢，有时将最高的w(Si)确定为0.10%，但是这个要求并不是很严格的；对某些炉次要加入足够量的硅，以便有0.10%（质量分数）的残留量，以此保证钢得以镇静。

镇静钢是在其生产过程中进行完全脱氧的，脱氧能通过硅、铝或两者一起的加入得以完成，或者通过钢液的真空处理来实现。由于这些方法中硅脱氧的成本最低，故经常用它脱氧。作为硅-镇静钢，w(Si)常规定为0.15%～0.30%，从而使生产厂家具有因炼钢工艺的变化而能够进行适当补偿的灵活性，并确保钢能满足大部分的应用。铝镇静钢或真空脱氧钢要求不得含有硅，故没有必要为其设定最低的硅含量。可以为所有经受镇静处理的普通碳素钢设定最高允许含硅量，而最小的硅含量就是钢若要经受硅镇静处理所必须的条件。硅也可特意加入一些合金钢里，同时起到脱氧剂和改善其性能的作用，此时硅含量有一个适合这些钢的可以接受的范围。

作为钢轧制品的用户和规范编制者，必须认识到这些产品中硅含量的确定是离不开其脱氧工艺的。在订购钢轧制品时，常要遵循标准技术规范（如ASTM技术规范），这些规范对于影响硅含量的各种因素都已有所考虑。在一些用例如低碳钢薄钢板的成形加工中，脱碳工艺的选用将会明显影响钢的性能，这时有必要对所要采用的工艺进行斟酌。

SAE-AISI 代号

如上所述，SAE-AISI系统是应用最为广泛的碳素钢和合金钢代号系统。从技术层面上看这是两种不同的系统，但是它们几乎是一致的，并作为两大范畴被有机地联系在一起。不过应当指出AISI已经停止了对钢的代号命名的工作。因此，对于最新资料读者应该参阅《SAE手册》，第1卷：材料。

SAE-AISI适用于半成品的锻件、热轧和冷精轧棒材、盘条和无缝钢管制品、结构型材、厚钢板、薄钢板、带钢以及焊接钢管。表2.3-9归纳了在SAE和AISI里所用的数字编号法。实际上在SAE或AISI中所列的一种特定的钢材，只是指它已经以相当大的批量投入了生产，而并不说明其他牌号的钢就不能选用，也不意味着任何一个特定的钢材生产商可生产所列的全部牌号的钢材。

表 2.3-9　碳素钢和合金钢的 SAE-AISI 系统代号命名法

数码和数字	钢材种类及其名义合金含量(质量分数,%)
碳素钢	
10*xx*①	普通碳素钢(Mn1.00 最高)
11*xx*	经加硫
12*xx*	经加硫和加磷
15*xx*	普通碳素钢(最高 Mn 范围:1.00~1.65)
锰钢	
13*xx*	Mn1.75
镍钢	
23*xx*	Ni3.50
25*xx*	Ni5.00
镍-铬钢	
31*xx*	Ni1.25;Cr0.65 和 0.80
32*xx*	Ni1.75;Cr1.07
33*xx*	Ni3.50;Cr1.50 和 1.57
34*xx*	Ni3.00;Cr0.77
钼钢	
40*xx*	Mo0.20 和 0.25
44*xx*	Mo0.40 和 0.52
铬-钼钢	
41*xx*	Cr0.50, 0.80 和 0.95;Mo0.12, 0.20, 0.25 和 0.30
镍-铬-钼钢	
43*xx*	Ni1.82;Cr0.50 和 0.80;Mo0.25
43BV*xx*	Ni1.82;Cr0.50;Mo0.12 和 0.25;V 0.03 最低
47*xx*	Ni1.05;Cr0.45;Mo0.20 和 0.35
81*xx*	Ni0.30;Cr0.40;Mo0.12
86*xx*	Ni0.55;Cr0.50;Mo0.20
87*xx*	Ni0.55;Cr0.50;Mo0.25
镍-铬-钼钢	
88*xx*	Ni0.55;Cr0.50;Mo0.35
93*xx*	Ni3.25;Cr1.20;Mo0.12
94*xx*	Ni0.45;Cr0.40;Mo0.12
97*xx*	Ni0.55;Cr0.20;Mo0.20
98*xx*	Ni1.00;Cr0.80;Mo0.25
镍-钼钢	
46*xx*	Ni0.85 和 1.82;Mo0.20 和 0.25
48*xx*	Ni3.50;Mo0.25
铬钢	
50*xx*	Cr0.27, 0.40, 0.50 和 0.65
51*xx*	Cr0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 和 1.05
50*xxx*	Cr0.50;C1.00 最低
51*xxx*	Cr1.02;C1.00 最低
52*xxx*	Cr1.45;C1.00 最低
铬-钒钢	
61*xx*	Cr0.60, 0.80 和 0.95;V0.10 和 0.15 最低
钨-铬钢	
72*xx*	W1.75;Cr0.75
硅-锰钢	
92*xx*	Si1.40 和 2.00;Mn0.65, 0.82 和 0.85;Cr0 和 0.65
硼钢	
*xx*B*xx*	B 表示硼钢
铅化钢	
*xx*L*xx*	L 表示铅化钢
钒钢	
*xx*V*xx*	V 表示钒钢

①代号中的最后两位数字 *xx* 代表碳含量(以百分比数表示)。

碳素钢的SAE-AISI 代号

如表 2.3-10 所示，在 SAE-AISI 系统里，碳素钢是由 1*xxx* 组别构成并且再分成四个不同子系，以此表示它们之间在一些基本性质上的区别。

普通碳素钢(1.00% 最高 Mn)。作为 10*xx* 的组别列于表 2.3-10 和表 2.3-11，注意其化学成分的范围和极限值是取决于其产品形式的。表 2.3-12 所示

是商用特性钢的代号。在碳素钢代号中的第二和第三位数字之间夹了一个字母 B，表示 w(B) 为 0.0005%~0.003% 的钢。同样的，在第二和第三位数字之间夹了一个字母 L，则表示 w(Pb) 为 0.15%~0.35% 的钢，以增强其切削性。

表 2.3-10 碳素钢化学成分

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P 最高	S 最高
G10050	1005	0.06 最高	0.35 最高	0.040	0.050
G10060	1006	0.08 最高	0.25~0.40	0.040	0.050
G10080	1008	0.10 最高	0.30~0.50	0.040	0.050
G10100	1010	0.08~0.13	0.30~0.60	0.040	0.050
G10120	1012	0.10~0.15	0.30~0.60	0.040	0.050
G10130	1013	0.11~0.16	0.50~0.80	0.040	0.050
G10150	1015	0.13~0.18	0.30~0.60	0.040	0.050
G10160	1016	0.13~0.18	0.60~0.90	0.040	0.050
G10170	1017	0.15~0.20	0.30~0.60	0.040	0.050
G10180	1018	0.15~0.20	0.60~0.90	0.040	0.050
G10190	1019	0.15~0.20	0.70~1.00	0.040	0.050
G10200	1020	0.18~0.23	0.30~0.60	0.040	0.050
G10210	1021	0.18~0.23	0.60~0.90	0.040	0.050
G10220	1022	0.18~0.23	0.22~0.28	0.040	0.050
G10230	1023	0.20~0.25	0.30~0.60	0.040	0.050
G10250	1025	0.22~0.28	0.22~0.28	0.040	0.050
G10260	1026	0.22~0.28	0.60~0.90	0.040	0.050
G10290	1029	0.25~0.31	0.60~0.90	0.040	0.050
G10300	1030	0.28~0.34	0.60~0.90	0.040	0.050
G10350	1035	0.32~0.38	0.60~0.90	0.040	0.050
G10370	1037	0.32~0.38	0.70~1.00	0.040	0.050
G10380	1038	0.35~0.42	0.60~0.90	0.040	0.050
G10390	1039	0.37~0.44	0.70~1.00	0.040	0.050
G10400	1040	0.37~0.44	0.60~0.90	0.040	0.050
G10420	1042	0.40~0.47	0.60~0.90	0.040	0.050
G10430	1043	0.40~0.47	0.70~1.00	0.040	0.050
G10440	1044	0.43~0.50	0.30~0.60	0.040	0.050
G10450	1045	0.43~0.50	0.60~0.90	0.040	0.050
G10460	1046	0.43~0.50	0.70~1.00	0.040	0.050
G10490	1049	0.46~0.53	0.60~0.90	0.040	0.050
G10500	1050	0.48~0.55	0.60~0.90	0.040	0.050
G10530	1053	0.48~0.55	0.70~1.00	0.040	0.050
G10550	1055	0.50~0.60	0.60~0.90	0.040	0.050

（续）

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P最高	S最高
G10590	1059	0.55~0.65	0.50~0.80	0.040	0.050
G10600	1060	0.55~0.65	0.60~0.90	0.040	0.050
G10640	1064	0.60~0.70	0.50~0.80	0.040	0.050
G10650	1065	0.60~0.70	0.60~0.90	0.040	0.050
G10690	1069	0.65~0.75	0.40~0.70	0.040	0.050
G10700	1070	0.65~0.75	0.60~0.90	0.040	0.050
G10740	1074	0.70~0.80	0.50~0.80	0.040	0.050
G10750	1075	0.70~0.80	0.40~0.70	0.040	0.050
G10780	1078	0.72~0.85	0.30~0.60	0.040	0.050
G10800	1080	0.75~0.88	0.60~0.90	0.040	0.050
G10840	1084	0.80~0.93	0.60~0.90	0.040	0.050
G10850	1085	0.80~0.93	0.70~1.00	0.040	0.050
G10860	1086	0.80~0.93	0.30~0.50	0.040	0.050
G10900	1090	0.85~0.98	0.60~0.90	0.040	0.050
G10950	1095	0.90~1.03	0.30~0.50	0.040	0.050

注：本表适用于锻件半成品、热轧和冷精轧棒材、盘条以及无缝管材。

①当对棒材和半成品的硅含量范围或极限值提出要求时，通常使用下列范围(质量分数)：0.10% max，0.10%~0.20%，0.15%~0.35%，0.20%~0.40%或0.30%~0.60%。对圆钢，则通常使用下列范围(质量分数)：0.10% max，0.07%~0.15%，0.10%~0.20%，0.15%~0.35%，0.20%~0.40%，0.30%~0.60%。本表中的钢生产时可以加入铅或硼。铅化钢中$w(Pb)$一般为0.15%~0.35%，并在其代号中插入字母L(10L45)，硼钢中$w(B)$可为0.0005%~0.003%，并在其代号中插入字母B(10B46)。

表2.3-11 碳素钢化学成分

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)				代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P最高	S最高	UNS	SAE-AISI	C	Mn	P最高	S最高
G10060	1006	0.08最高	0.45最高	0.040	0.050	G10210	1021	0.17~0.23	0.60~0.90	0.040	0.050
G10080	1008	0.10最高	0.50最高	0.040	0.050	G10220	1022	0.17~0.23	0.70~1.00	0.040	0.050
G10090	1009	0.15最高	0.60最高	0.040	0.050	G10230	1023	0.19~0.25	0.30~0.60	0.040	0.050
G10100	1010	0.08~0.13	0.30~0.60	0.040	0.050	G10250	1025	0.22~0.28	0.30~0.60	0.040	0.050
G10120	1012	0.10~0.15	0.30~0.60	0.040	0.050	G10260	1026	0.22~0.28	0.60~0.90	0.040	0.050
G10150	1015	0.12~0.18	0.30~0.60	0.040	0.050	G10300	1030	0.27~0.34	0.60~0.90	0.040	0.050
G10160	1016	0.12~0.18	0.60~0.90	0.040	0.050	G10330	1033	0.29~0.36	0.70~1.00	0.040	0.050
G10170	1017	0.14~0.20	0.30~0.60	0.040	0.050	G10350	1035	0.31~0.38	0.60~0.90	0.040	0.050
G10180	1018	0.14~0.20	0.60~0.90	0.040	0.050	G10370	1037	0.31~0.38	0.70~1.00	0.040	0.050
G10190	1019	0.14~0.20	0.70~1.00	0.040	0.050	G10380	1038	0.34~0.42	0.60~0.90	0.040	0.050
G10200	1020	0.17~0.23	0.30~0.60	0.040	0.050	G10390	1039	0.36~0.44	0.70~1.00	0.040	0.050

（续）

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)				代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P最高	S最高	UNS	SAE-AISI	C	Mn	P最高	S最高
G10400	1040	0.36~0.44	0.60~0.90	0.040	0.050	G10700	1070	0.65~0.76	0.60~0.90	0.040	0.050
G10420	1042	0.39~0.47	0.60~0.90	0.040	0.050	G10740	1074	0.69~0.80	0.50~0.80	0.040	0.050
G10430	1043	0.39~0.47	0.70~1.00	0.040	0.050	G10750	1075	0.69~0.80	0.40~0.70	0.040	0.050
G10450	1045	0.42~0.50	0.60~0.90	0.040	0.050	G10780	1078	0.72~0.86	0.30~0.60	0.040	0.050
G10460	1046	0.42~0.50	0.70~1.00	0.040	0.050	G10800	1080	0.74~0.88	0.60~0.90	0.040	0.050
G10490	1049	0.45~0.53	0.60~0.90	0.040	0.050	G10840	1084	0.80~0.94	0.60~0.90	0.040	0.050
G10500	1050	0.47~0.55	0.60~0.90	0.040	0.050	G10850	1085	0.80~0.94	0.70~1.00	0.040	0.050
G10550	1055	0.52~0.60	0.60~0.90	0.040	0.050	G10860	1086	0.80~0.94	0.30~0.50	0.040	0.050
G10600	1060	0.55~0.66	0.60~0.90	0.040	0.050	G10900	1090	0.84~0.98	0.60~0.90	0.040	0.050
G10640	1064	0.59~0.70	0.50~0.80	0.040	0.050	G10950	1095	0.90~1.04	0.30~0.50	0.040	0.050
G10650	1065	0.59~0.70	0.60~0.90	0.040	0.050						

注：本表适用于结构型材、厚钢板、带钢、薄钢板以及焊接管材。

①当对硅含量范围或极限值提出要求时，通常使用下列范围(质量分数)：至SAE1025含，0.10%max，0.10%~0.25%或0.15%~0.35%；超出SAE1025，0.10%~0.25%或0.15%~0.35%。

表2.3-12　商用特性钢的化学成分范围和极限值

SAE-AISI代号	浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)				SAE-AISI代号	浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)			
	C	Mn	P最高	S最高		C	Mn	P最高	S最高
M1008	0.10最高	0.25~0.60	0.04	0.05	M1020	0.17~0.24	0.25~0.60	0.04	0.05
M1010	0.07~0.14	0.25~0.60	0.04	0.05	M1023	0.19~0.27	0.25~0.60	0.04	0.05
M1012	0.09~0.16	0.25~0.60	0.04	0.05	M1025	0.20~0.30	0.25~0.60	0.04	0.05
M1015	0.12~0.19	0.25~0.60	0.04	0.05	M1031	0.26~0.36	0.25~0.60	0.04	0.05
M1017	0.14~0.21	0.25~0.60	0.04	0.05	M1044	0.40~0.50	0.25~0.60	0.04	0.05

①不生产任何规定含硅量的商用特性钢棒材。

易切削钢牌号。表2.3-13所示是在11*xx*组别里的加硫碳素钢，表2.3-14所示是在12*xx*组别里的加硫和加磷碳素钢。这两组钢都应用于要求有极好切削性能的用途。

表2.3-13　碳素易切削钢(加硫)的化学成分

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P最高	S最高
G11080	1108	0.08~0.13	0.50~0.80	0.040	0.08~0.13
G11100	1110	0.08~0.13	0.30~0.60	0.040	0.08~0.13
G11170	1117	0.14~0.20	1.00~1.30	0.040	0.08~0.13
G11180	1118	0.14~0.20	1.30~1.60	0.040	0.08~0.13

（续）

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①（质量分数，%）			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P 最高	S 最高
G11370	1137	0.32～0.39	1.35～1.65	0.040	0.08～0.13
G11390	1139	0.35～0.43	1.35～1.65	0.040	0.13～0.20
G11400	1140	0.37～0.44	0.70～1.00	0.040	0.08～0.13
G11410	1141	0.37～0.45	1.35～1.65	0.040	0.08～0.13
G11440	1144	0.40～0.48	1.35～1.65	0.040	0.24～0.33
G11460	1146	0.42～0.49	0.70～1.00	0.040	0.08～0.13
G11510	1151	0.48～0.55	0.70～1.00	0.040	0.08～0.13

注：本表适用于锻件半成品、热轧和冷精轧棒材、盘条和无缝钢管。

①当对型材和半成品的铅或硅含量范围或极限值提出要求时，可使用表2.3-10所列的数值。对棒材通常可用以下硅的含量范围或极限值（质量分数）：直至SAE1117含，0.10%max；SAE1117并超出，0.10%max，0.10%～0.20%或0.15%～0.35%。

表2.3-14 易切削（经加硫和加磷）碳素钢的化学成分

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①（质量分数，%）				
UNS	SAE-AISI	C 最高	Mn	P	S	Pb
G12110	1211	0.13	0.60～0.90	0.07～0.12	0.10～0.15	—
G12120	1212	0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.16～0.23	—
G12130	1213	0.13	0.70～1.00	0.07～0.12	0.24～0.33	—
G12150	1215	0.09	0.75～1.05	0.04～0.09	0.26～0.35	—
G12144	12L14	0.15	0.85～1.15	0.04～0.09	0.26～0.35	0.15～0.35

注：适用于锻件半成品、热轧和冷精轧型材、盘条和无缝钢管。

①当对铅含量范围或极限值提出要求时，可使用表2.3-10所列的数值。以规定硅的含量生产12*xx*系列钢的工艺是不常用的，因为它对切削性能有负面影响。

普通碳素钢（w(Mn)1.0%～1.65%）。表2.3-15和表2.3-16所列的钢中的w(Mn)，名义上为0.9%～1.5%，但不含其他合金元素。现在这些钢的代号为15*xx*，而以前使用的代号为10*xx*。

表2.3-15 高锰碳素钢的化学成分

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①（质量分数，%）				代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①（质量分数，%）			
UNS	SAE-AISI	C	Mn	P 最高	S 最高	UNS	SAE-AISI	C	Mn	P 最高	S 最高
G15130	1513	0.10～0.16	1.10～1.40	0.040	0.050	G15410	1541	0.36～0.44	1.35～1.65	0.040	0.050
G15220	1522	0.18～0.24	1.10～1.40	0.040	0.050	G15480	1548	0.44～0.52	1.10～1.40	0.040	0.050
G15240	1524	0.19～0.25	1.35～1.65	0.040	0.050	G15510	1551	0.45～0.56	0.85～1.15	0.040	0.050
G15260	1526	0.22～0.29	1.10～1.40	0.040	0.050	G15520	1552	0.47～0.55	1.20～1.50	0.040	0.050
G15270	1527	0.22～0.29	1.20～1.50	0.040	0.050	G15610	1561	0.55～0.65	0.75～1.05	0.040	0.050
G15360	1536	0.30～0.37	1.20～1.50	0.040	0.050	G15660	1566	0.60～0.71	0.85～1.15	0.040	0.050

注：本表适用于锻件半成品、热轧和冷精轧型材、盘条和无缝钢管。

①当对硅、铅硼的含量范围或极限值提出要求时，可使用表2.3-10所列的数值。

表2.3-16　高锰碳素钢的化学成分

代号		浇铸或熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)				原SAE代号
UNS	SAE-AISI	C最高	Mn	P最高	S最高	
G15240	1524	0.18~0.25	1.30~1.65	0.040	0.050	1024
G15270	1527	0.22~0.29	1.20~1.55	0.040	0.050	1027
G15360	1536	0.30~0.38	1.20~1.55	0.040	0.050	1036
G15410	1541	0.36~0.45	1.30~1.65	0.040	0.050	1041
G15480	1548	0.43~0.52	1.05~1.45	0.040	0.050	1048
G15520	1552	0.46~0.55	1.20~1.55	0.040	0.050	1052

注：本表适用于结构型材、厚钢板、带钢、薄钢板以及焊接管材。
①当对硅的含量范围或极限值提出要求时，可使用表2.3-11所列的数值。

H-钢。有些钢除了有化学成分的范围和极限值的要求外，还有淬硬性的要求。它们与没有淬硬性要求的同类牌号钢的差别在于在其牌号后面加注字H(表2.3-17)。表2.3-17所列的钢的淬硬性范围可参见SAE J1268。

表2.3-17　碳素和碳-硼H-钢的化学成分

代号		钢包化学成分(质量分数,%)				
UNS	SAE或AISI	C	Mn	Si	P最高①	S最高①
H10380	1038H	0.34~0.43	0.51~1.00	0.15~0.35	0.040	0.050
H10450	1045H	0.42~0.51	0.50~1.00	0.15~0.35	0.040	0.050
H15220	1522H	0.17~0.25	1.00~1.50	0.15~0.35	0.040	0.050
H15240	1524H	0.18~0.26	1.25~1.75	0.15~0.35	0.040	0.050
H15260	1526H	0.21~0.30	1.00~1.50	0.15~0.35	0.040	0.050
H15410	1541H	0.35~0.45	1.25~1.75	0.15~0.35	0.040	0.050
H15211	15B21H②	0.17~0.24	0.70~1.20	0.15~0.35	0.040	0.050
H15281	15B28H②	0.25~0.34	1.00~1.50	0.15~0.35	0.040	0.050
H15301	15B30H②	0.27~0.35	0.70~1.20	0.15~0.35	0.040	0.050
H15351	15B35H②	0.31~0.39	0.70~1.20	0.15~0.35	0.040	0.050
H15371	15B37H②	0.30~0.39	1.00~1.50	0.15~0.35	0.040	0.050
H15411	15B41H②	0.35~0.45	1.25~1.75	0.15~0.35	0.040	0.050
H15481	15B48H②	0.43~0.53	1.00~1.50	0.15~0.35	0.040	0.050
H15621	15B62H②	0.54~0.67	1.00~1.50	0.40~0.60	0.040	0.050

①如果指定或要求用电炉工艺，w(P)和w(S)的极限值为0.025%，SAE或AISI数字前加注E。　②这些钢中w(B)为0.005%~0.003%。

合金钢的SAE-AISI代号

当一种钢的合金元素最高含量范围超过一个或多个以下极限值(质量分数)时，就可认定其为合金钢：1.65% Mn、0.60% Si或0.60% Cu。合金钢的认定范围还包括含有特定或要求范围的、或最小含量(质量分数)的下列元素的钢：铝、硼、铬(高至3.99%)、钴、铌、钼、镍、钛、锆，或为了在热处理之后能增强其力学性能和韧性而添加的任何其他合金元素。然而在某些情况下，合金的加入是为了在特定应用工况下减少对环境的破坏。一般而言，用于SAE-AISI结构钢的合金含量(质量分数)不应超过5%。

合金薄钢板和带料可用于热轧或冷轧钢的卷材及其切断长度上。其他由 SAE-AISI 代号所覆盖的合金钢产品类型包括热轧板，热轧、冷轧和冷拉的型材、棒材和盘条。

在 SAE-AISI 代号系统里，一种合金钢中的主要合金元素是由代号中的前两位数字表示的(表 2. 3-9)。而它的最后两位数字表示的是其含碳量百分数的一百倍。合金钢 SAE-AISI 标准牌号的化学成分由表 2. 3-18 和表 2. 3-19 列出。对于有一定淬硬性要求的合金钢，要用 H 结尾同与之相对应而没有淬硬性要求的合金钢相区分(表 2. 3-20)。SAE J1268 详细阐述了这类钢的相应淬硬性范围。作为碳素钢，字母 B 插在第二个和第三个字母之间，以此表示该种钢含有硼。电炉生产的钢，则冠之以字头 E 来表示。

表 2. 3-18　合金钢的化学成分

代　号			钢包化学成分极限值①(质量分数,%)								
UNS	SAE	AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
G13300	1330	1330	0. 28 ~ 0. 33	1. 60 ~ 1. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	—	—
G13350	1335	1335	0. 33 ~ 0. 38	1. 60 ~ 1. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	—	—
G13400	1340	1340	0. 38 ~ 0. 43	1. 60 ~ 1. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	—	—
G13450	1345	1345	0. 43 ~ 0. 48	1. 60 ~ 1. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	—	—
G40230	4023	4023	0. 20 ~ 0. 25	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	—	—
G40240	4024	4024	0. 20 ~ 0. 25	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 035 ~ 0. 050	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G40270	4027	4027	0. 25 ~ 0. 30	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G40280	4028	4028	0. 25 ~ 0. 30	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 035 ~ 0. 050	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G40320	4032	—	0. 30 ~ 0. 35	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G40370	4037	4037	0. 35 ~ 0. 40	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G40420	4042	—	0. 40 ~ 0. 45	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G40470	4047	4047	0. 45 ~ 0. 50	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 20 ~ 0. 30	—
G41180	4118	4118	0. 18 ~ 0. 23	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 40 ~ 0. 60	0. 08 ~ 0. 15	—
G41300	4130	4130	0. 28 ~ 0. 33	0. 40 ~ 0. 60	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41350	4135	—	0. 33 ~ 0. 38	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41370	4137	4137	0. 35 ~ 0. 40	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41400	4140	4140	0. 38 ~ 0. 43	0. 75 ~ 1. 00	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41420	4142	4142	0. 40 ~ 0. 45	0. 75 ~ 1. 00	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41450	4145	4145	0. 41 ~ 0. 48	0. 75 ~ 1. 00	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41470	4147	4147	0. 45 ~ 0. 50	0. 75 ~ 1. 00	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41500	4150	4150	0. 48 ~ 0. 53	0. 75 ~ 1. 00	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 80 ~ 1. 10	0. 15 ~ 0. 25	—
G41610	4161	4161	0. 56 ~ 0. 64	0. 75 ~ 1. 00	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	0. 70 ~ 0. 90	0. 25 ~ 0. 35	—
G43200	4320	4320	0. 17 ~ 0. 22	0. 45 ~ 0. 65	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	1. 65 ~ 2. 00	0. 40 ~ 0. 60	0. 20 ~ 0. 30	—
G43400	4340	4340	0. 38 ~ 0. 43	0. 60 ~ 0. 80	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	1. 65 ~ 2. 00	0. 70 ~ 0. 90	0. 20 ~ 0. 30	—
G43406	E4340②	E4340	0. 38 ~ 0. 43	0. 65 ~ 0. 85	0. 025	0. 025	0. 15 ~ 0. 35	1. 65 ~ 2. 00	0. 70 ~ 0. 90	0. 20 ~ 0. 30	—
G44220	4422	—	0. 20 ~ 0. 25	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 35 ~ 0. 45	—
G44270	4427	—	0. 24 ~ 0. 29	0. 70 ~ 0. 90	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 35	—	—	0. 35 ~ 0. 45	—
G46150	4615	4615	0. 13 ~ 0. 18	0. 45 ~ 0. 65	0. 035	0. 040	0. 15 ~ 0. 25	1. 65 ~ 2. 00	—	0. 20 ~ 0. 30	—

（续）

代号			钢包化学成分极限值①（质量分数,%）								
UNS	SAE	AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
G46170	4617	—	0.15～0.20	0.45～0.65	0.035	0.040	0.15～0.35	1.65～2.00	—	0.20～0.30	—
G46200	4620	4620	0.17～0.22	0.45～0.65	0.035	0.040	0.15～0.35	1.65～2.00	—	0.20～0.30	—
G46260	4626	4626	0.24～0.29	0.45～0.65	0.035	0.04max	0.15～0.35	0.70～1.00	—	0.15～0.25	—
G47180	4718	4718	0.16～0.21	0.70～0.90	—	—	—	0.90～1.20	0.35～0.55	0.30～0.40	—
G47200	4720	4720	0.17～0.22	0.50～0.70	0.035	0.040	0.15～0.35	0.90～1.20	0.35～0.55	0.15～0.25	—
G48150	4815	4815	0.13～0.18	0.40～0.60	0.035	0.040	0.15～0.35	3.25～3.75	—	0.20～0.30	—
G48170	4817	4817	0.15～0.20	0.40～0.60	0.035	0.040	0.15～0.35	3.25～3.75	—	0.20～0.30	—
G48200	4820	4820	0.18～0.23	0.50～0.70	0.035	0.040	0.15～0.35	3.25～3.75	—	0.20～0.30	—
G50401	50B40③	—	0.38～0.43	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.40～0.60	—	—
G50441	50B44③	50B44	0.43～0.48	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.40～0.60	—	—
G50460	5046	—	0.43～0.48	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.20～0.35	—	—
G50461	50B46③	50B46	0.44～0.49	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.20～0.35	—	—
G50501	50B50③	50B50	0.48～0.53	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.40～0.60	—	—
G50600	5060	—	0.56～0.64	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.40～0.60	—	—
G50601	50B60③	50B60	0.56～0.64	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.40～0.60	—	—
G51150	5115	—	0.13～0.18	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51170	5117	5117	0.15～0.20	0.70～0.90	0.040	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51200	5120	5120	0.17～0.22	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51300	5130	5130	0.28～0.33	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.80～1.10	—	—
G51320	5132	5132	0.30～0.35	0.60～0.80	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.75～1.00	—	—
G51350	5135	5135	0.33～0.38	0.60～0.80	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.80～1.05	—	—
G51400	5140	5140	0.38～0.43	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51470	5147	5147	0.46～0.51	0.70～0.95	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.85～1.15	—	—
G51500	5150	5150	0.48～0.53	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51550	5155	5155	0.51～0.59	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51600	5160	5160	0.56～0.64	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G51601	51B60③	51B60	0.56～0.64	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.70～0.90	—	—
G50986	50100②	—	0.98～1.10	0.25～0.45	0.025	0.025	0.15～0.35	—	0.40～0.60	—	—
G51986	51100②	E51100	0.98～1.10	0.25～0.45	0.025	0.025	0.15～0.35	—	0.90～1.15	—	—
G52986	52100②	E52100	0.98～1.10	0.25～0.45	0.025	0.025	0.15～0.35	—	1.30～1.60	—	—
G61180	6118	6118	0.16～0.21	0.50～0.70	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.50～0.70	—	0.10～0.15
G61500	6150	6150	0.48～0.53	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	—	0.80～1.10	—	0.15最小
G81150	8115	8115	0.13～0.18	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	0.20～0.40	0.30～0.50	0.08～0.15	—
G81451	81B45③	81B45	0.43～0.48	0.75～1.00	0.035	0.040	0.15～0.35	0.20～0.40	0.35～0.55	0.08～0.15	—
G86150	8615	8615	0.13～0.18	0.70～0.90	0.035	0.040	0.15～0.35	0.40～0.70	0.40～0.60	0.15～0.25	—

（续）

代号			钢包化学成分极限值①（质量分数，%）								
UNS	SAE	AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
G86170	8617	8617	0.15~0.20	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86200	8620	8620	0.18~0.23	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86220	8622	8622	0.20~0.25	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86250	8625	8625	0.23~0.28	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86270	8627	8627	0.25~0.30	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86300	8630	8630	0.28~0.33	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86370	8637	8637	0.35~0.40	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86400	8640	8640	0.38~0.43	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86420	8642	8642	0.40~0.45	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86450	8645	8645	0.43~0.48	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86451	86B45③	—	0.43~0.48	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86500	8650	—	0.48~0.53	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86550	8655	8655	0.51~0.59	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G86600	8660	—	0.56~0.64	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25	—
G87200	8720	8720	0.18~0.23	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.20~0.30	—
G87400	8740	8740	0.38~0.43	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.20~0.30	—
G88220	8822	8822	0.20~0.25	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.30~0.40	—
G92540	9254	—	0.51~0.59	0.60~0.80	0.035	0.040	1.20~1.60	—	0.60~0.80	—	—
G92600	9260	9260	0.56~0.64	0.75~1.00	0.035	0.040	1.80~2.20	—	—	—	—
G93106	9310②	—	0.08~0.13	0.45~0.65	0.025	0.025	0.15~0.35	3.00~3.50	1.00~1.40	0.08~0.15	—
G94151	94B15③	—	0.13~0.18	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.30~0.60	0.30~0.50	0.08~0.15	—
G94171	94B17③	94B17	0.15~0.20	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.30~0.60	0.30~0.50	0.08~0.15	—
G94301	94B30③	94B30	0.28~0.33	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.30~0.60	0.30~0.50	0.08~0.15	—

注：本表适用于初轧坯、方坯、扁坯及热轧和冷精轧型材。

①在合金钢中，会发现少量的某些并未规定或要求的元素。这些元素不超过以下最高含量（质量分数）时，则可被认为是不要紧的和许可的：铜，0.35%，镍，0.25%，铬，0.20%，钼，0.06%。　②电炉钢。　③w(B)为0.0005%~0.003%。

表2.3-19　按SAE-AISI标准用于结构用途的合金厚钢板化学成分范围和极限值

代号		熔炼化学成分范围和极限值①（质量分数，%）					
SAE-AISI	UNS	C	Mn	Si②	Cr	Ni	Mo
1330	G13300	0.27~0.34	1.50~1.90	0.15~0.30	—	—	—
1335	G13350	0.32~0.39	1.50~1.90	0.15~0.30	—	—	—
1340	G13400	0.36~0.44	1.50~1.90	0.15~0.30	—	—	—
1345	G13450	0.41~0.49	1.50~1.90	0.15~0.30	—	—	—
4118	041180	0.17~0.23	0.60~0.90	0.15~0.30	0.40~0.65	—	0.08~0.15
4130	G41300	0.27~0.34	0.35~0.60	0.15~0.30	0.80~1.15	—	0.15~0.25

(续)

代号		熔炼化学成分范围和极限值①(质量分数,%)					
SAE-AISI	UNS	C	Mn	Si②	Cr	Ni	Mo
4135	G41350	0.32~0.39	0.65~0.95	0.15~0.30	0.80~1.15	—	0.15~0.25
4137	G41370	0.33~0.40	0.65~0.95	0.15~0.30	0.80~1.15	—	0.15~0.25
4140	G41400	0.36~0.44	0.70~1.00	0.15~0.30	0.80~1.15	—	0.15~0.25
4142	G41420	0.38~0.46	0.70~1.00	0.15~0.30	0.80~1.15	—	0.15~0.25
4145	G41450	0.41~0.49	0.70~1.00	0.15~0.30	0.80~1.15	—	0.15~0.25
4340	G43400	0.36~0.44	0.55~0.80	0.15~0.30	0.60~0.90	1.65~2.00	0.20~0.30
E4340③	G43406	0.37~0.44	0.60~0.85	0.15~0.30	0.65~0.90	1.65~2.00	0.20~0.30
4615	G46150	0.12~0.18	0.40~0.65	0.15~0.30	—	1.65~2.00	0.20~0.30
4617	G46170	0.15~0.21	0.40~0.65	0.15~0.30	—	1.65~2.00	0.20~0.30
4620	G46200	0.16~0.22	0.40~0.65	0.15~0.30	—	1.65~2.00	0.20~0.30
5160	G51600	0.54~0.65	0.70~1.00	0.15~0.30	0.60~0.90	—	—
6150④	G61500	0.46~0.54	0.60~0.90	0.15~0.30	0.80~1.15	—	—
8615	G86150	0.12~0.18	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8617	G86170	0.15~0.21	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8620	G86200	0.17~0.23	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8622	G86220	0.19~0.25	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8625	G86250	0.22~0.29	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8627	G86270	0.24~0.31	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8630	G86300	0.27~0.34	0.60~0.90	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8637	G86370	0.33~0.40	0.70~1.00	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8640	G86400	0.36~0.44	0.70~1.00	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8655	G86550	0.49~0.60	0.70~1.00	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25
8742	G87420	0.38~0.46	0.70~1.00	0.15~0.30	0.35~0.60	0.40~0.70	0.20~0.30

注：硼和铅可加入其成分里。会发现少量的某些不要求的元素。这些元素不超过以下的最高含量(质量分数)时，则可被认为是不要紧的和许可的：铜，0.35%；镍，0.25%；铬，0.20%；钼，0.06%。

①所示的范围和极限值适用于以平炉和碱性吹氧工艺生产的钢，其 w(P)最高为0.035%、w(S)最高为0.04%。对于用电炉生产的钢，w(P)和 w(S)最高均为0.025%。 ②其他硅的含量可根据需要决定。如由客户规定 w(Si)，则可以定为0.10%~0.20%，0.20%~0.30%和最高0.35%(当碳脱氧)。 ③所冠的字头"E"表示其钢是用电炉生产的。 ④w(V)最低为0.15%V。

表2.3-20 标准H-合金钢的化学成分

H-钢		钢包化学成分极限值①②(质量分数,%)						
UNS代号	SAE代号或AISI代号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
H13300	1330H	0.27~0.33	1.45~2.05	0.15~0.35	—	—	—	—
H13350	1335H	0.32~0.38	1.45~2.05	0.15~0.35	—	—	—	—

（续）

H-钢		钢包化学成分极限值[1][2]（质量分数,%）						
UNS 代号	SAE 代号或 AISI 代号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
H13400	1340H	0.37～0.44	1.45～2.05	0.15～0.35	—	—	—	—
H13450	1345H	0.42～0.49	1.45～2.05	0.15～0.35	—	—	—	—
H40270	4027H	0.24～0.30	0.60～1.00	0.15～0.35	—	—	0.20～0.30	—
H40280[3]	4028H[3]	0.24～0.30	0.60～1.00	0.15～0.35	—	—	0.20～0.30	—
H40320	4032H	0.29～0.35	0.60～1.00	0.15～0.35	—	—	0.20～0.30	—
H40370	4037H	0.34～0.41	0.60～1.00	0.15～0.35	—	—	0.20～0.30	—
H40420	4042H	0.39～0.46	0.60～1.00	0.15～0.35	—	—	0.20～0.30	—
H40470	4047H	0.44～0.51	0.60～1.00	0.15～0.35	—	—	0.20～0.30	—
H41180	4118H	0.17～0.23	0.60～1.00	0.15～0.35	—	0.30～0.70	0.08～0.15	—
H41300	4130H	0.27～0.33	0.30～0.70	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41350	4135H	0.32～0.38	0.60～1.00	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41370	4137H	0.34～0.41	0.60～1.00	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41400	4140H	0.37～0.44	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41420	4142H	0.39～0.46	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41450	4145H	0.42～0.49	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41470	4147H	0.44～0.51	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41500	4150H	0.47～0.54	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.75～1.20	0.15～0.25	—
H41610	4161H	0.55～0.65	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.65～0.95	0.20～0.35	—
H43200	4320H	0.17～0.23	0.40～0.70	0.15～0.35	1.55～2.00	0.35～0.65	0.20～0.30	—
H43400	4340H	0.37～0.44	0.55～0.90	0.15～0.35	1.55～2.00	0.65～0.95	0.20～0.30	—
H43406[4]	E4340H[4]	0.37～0.44	0.60～0.95	0.15～0.35	1.55～2.00	0.65～0.95	0.20～0.30	—
H46200	4620H	0.17～0.23	0.35～0.75	0.15～0.35	1.55～2.00	—	0.20～0.30	—
H47180	4718H	0.15～0.21	0.60～0.95	0.15～0.35	0.85～1.25	0.30～0.60	0.30～0.40	—
H47200	4720H	0.17～0.23	0.45～0.75	0.15～0.35	0.85～1.25	0.30～0.60	0.15～0.25	—
H48150	4815H	0.12～0.18	0.30～0.70	0.15～0.35	3.20～3.80	—	0.20～0.30	—
H48170	4817H	0.14～0.20	0.30～0.70	0.15～0.35	3.20～3.80	—	0.20～0.30	—
H48200	4820H	0.17～0.23	0.40～0.80	0.15～0.35	3.20～3.80	—	0.20～0.30	—
H50401[5]	50B40H[5]	0.37～0.44	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.30～0.70	—	—
H50441[5]	50B44H[5]	0.42～0.49	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.30～0.70	—	—
H50460	5046H	0.43～0.50	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.13～0.43	—	—
H50461[5]	50B46H[5]	0.43～0.50	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.13～0.43	—	—
H50501[5]	50B50H[5]	0.47～0.54	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.30～0.70	—	—
H50601[5]	50B60H[5]	0.55～0.65	0.65～1.10	0.15～0.35	—	0.30～0.70	—	—
H51200	5120H	0.17～0.23	0.60～1.00	0.15～0.35	—	0.60～1.00	—	—
H51300	5130H	0.27～0.33	0.60～1.10	0.15～0.35	—	0.75～1.20	—	—

（续）

H-钢		钢包化学成分极限值①②（质量分数,%）						
UNS代号	SAE代号或AISI代号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
H51320	5132H	0.29~0.35	0.50~0.90	0.15~0.35	—	0.65~1.10	—	—
H51350	5135H	0.32~0.38	0.50~0.90	0.15~0.35	—	0.70~1.15	—	—
H51400	5140H	0.37~0.44	0.60~1.00	0.15~0.35	—	0.60~1.00	—	—
H51470	5147H	0.45~0.52	0.60~1.05	0.15~0.35	—	0.80~1.25	—	—
H51500	5150H	0.47~0.54	0.60~1.00	0.15~0.35	—	0.60~1.00	—	—
H51550	5155H	0.50~0.60	0.60~1.00	0.15~0.35	—	0.60~1.00	—	—
H51600	5160H	0.55~0.65	0.65~1.10	0.15~0.35	—	0.60~1.00	—	—
H51601⑤	51B60H⑤	0.55~0.65	0.65~1.10	0.15~0.35	—	0.60~1.00	—	—
H61180	6118H	0.15~0.21	0.40~0.80	0.15~0.35	—	0.40~0.80	—	0.10~0.15
H61500	6150H	0.47~0.54	0.60~1.00	0.15~0.35	—	0.75~1.20	—	0.15
H81451⑤	81B455⑤	0.42~0.49	0.70~1.05	0.15~0.35	0.15~0.45	0.30~0.60	0.08~0.15	—
H86170	8617H	0.14~0.20	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86200	8620H	0.17~0.23	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86220	8622H	0.19~0.25	0.60~9.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86250	8625H	0.22~0.28	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86270	8627H	0.24~0.30	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86300	8630H	0.27~0.33	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86301⑤	86B30H⑤	0.27~0.33	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86370	8637H	0.34~0.41	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86400	8640H	0.37~0.44	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86420	8642H	0.39~0.46	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86450	8645H	0.42~0.49	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86451⑤	86B45H9⑤	0.42~0.49	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86500	8650H	0.47~0.54	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86550	8655H	0.50~0.60	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H86600	8660H	0.55~0.65	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25	—
H87200	8720H	0.17~0.23	0.60~0.95	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.20~0.30	—
H87400	8740H	0.37~0.44	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.20~0.30	—
H88220	8822H	0.19~0.25	0.70~1.05	0.15~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.30~0.40	—
H92600	9260H	0.55~0.65	0.65~1.10	1.70~2.20	—	—	—	—
H93100④	9310H④	0.07~0.13	0.40~0.70	0.15~0.35	2.95~3.55	1.00~1.45	0.08~0.15	—
H94151⑤	94B15H⑤	0.12~0.18	0.70~1.05	0.15~0.35	0.25~0.65	0.25~0.55	0.08~0.15	—
H94171⑤	94B17H⑤	0.14~0.20	0.70~1.05	0.15~0.35	0.25~0.65	0.25~0.55	0.08~0.15	—
H94301⑤	94B30H⑤	0.27~0.33	0.70~1.05	0.15~0.35	0.25~0.65	0.25~0.55	0.08~0.15	—

①在合金钢里会发现少量的某些没有规定或要求的元素。这些元素不超过以下的最高含量（质量分数）时，则可被认为是不要紧的和许可的：铜，0.35%；镍，0.25%；铬，0.20%；钼，0.06%。　②对于平炉和碱性吹氧工艺生产的钢，其w(P)最高为0.035%、w(S)最高为0.04%。对于用电炉生产的钢，w(P)和w(S)最高均不得超过0.025%。　③w(S)为0.035%~0.050%。　④电炉钢。　⑤这些钢中w(B)为0.0005%~0.003%。摘自参考文献[26]

用于高强度薄钢板的SAE-AISI 代号

SAE 和 AISI 都有用于高强度薄钢板的代号系统(包括结构钢和 HSLA 牌号)。利用该系统，高强度钢被定义为其薄钢板产品具有的最小屈服强度为 240MPa (无论为达到该强度其所含的化学成分和所采用的生产工艺)合金钢和不锈钢不采用这些分类系统。表 2.3-21 对 SAE 和 AISI 这两种系统进行了比较。

表 2.3-21　高强度薄钢板的 SAE 和 AISI 两种代号系统的比较

属　性	SAE	AISI
屈服强度①/ksi	035	035
	040	040
	045	045
	050	050
		055
	060	060
		065
	070	070
	080	080
		100
		120
		140
		160
		190

属　性	SAE	AISI
化学性质②	A	S
	B	S
	C	S
	S	S
	W	W
	X	X
	Y	X
	Z	X
		D
碳含量③	H	—
	L	—
脱氧工艺	O	O
	K	K
	F	F

①SAE，所适用的屈服强度以 ksi 为单位的已全部列出。AISI 所列的仅为有代表性的，可按生产厂家的选择进一步增加。②SAE 下面所示的 A、B、C 和 S 代表 C、Mn、N 和 P 的不同含量组合。它们在 AISI 里按 S 分组。SAE 里的 X、Y 和 Z 分别代表可在屈服强度和抗拉强度之间的 10ksi、15ksi 和 20ksi 的范围里延伸的微量合金钢。它们在 AISI 里按 X 分组。W 的牌号两者相当。对于 AISI 里的 D，SAE 里没有与其等同的化学性质。　③作为标号 H 与 L 的含碳量，随 SAE 里钢的牌号而改变。

薄钢板的 SAE 代号系统。由 SAE 所推荐的 J1392 工艺适用于热轧、冷轧和镀层薄钢板，还能替代 J410c 用于这些特定的产品型号。表 2.3-22 和表 2.3-23 示出了 J1392 所包括的不同牌号的力学性能。

表 2.3-22　SAE J1392 规定的热轧高强度薄钢板的力学性能

牌　号	最小屈服强度		最小抗拉强度		2in(50mm)长的最小伸长率①(%)
	ksi	MPa	ksi	MPa	
035A，B，C，S	35	240	②	②	21
035X，Y，Z	35	240	②	②	28
A40A，B，C，S	40	280	②	②	20
040 X，Y，Z	40	280	②	②	27
045A，B，C，S	45	310	②	②	18
045W	45	310	65	450	25
045X	45	310	55	380	25
045Y	45	310	60	410	25

牌　号	最小屈服强度		最小抗拉强度		2in(50mm)长的最小伸长率①(%)
	ksi	MPa	ksi	MPa	
045Z	45	310	65	450	25
050A，B，C，S	50	340	②	②	16
050W	50	340	70	480	22
050X	50	340	60	410	22
050Y	50	340	65	450	22
050Z	50	340	70	480	22
060X	60	410	70	480	20
060Y	60	410	75	520	20

（续）

牌号	最小屈服强度		最小抗拉强度		2in(50mm)长的最小伸长率①(%)	牌号	最小屈服强度		最小抗拉强度		2in(50mm)长的最小伸长率①(%)
	ksi	MPa	ksi	MPa			ksi	MPa	ksi	MPa	
070X	70	480	80	550	17	080X	80	550	90	620	14
070Y	70	480	85	590	17	080Y	80	550	95	650	14

①伸长率取决于试件的几何形状（横截面积）。较厚和较宽的试件会有较高的百分比。 ②一般不用最小抗拉强度。

表2.3-23 SAE J1392规定的冷轧和涂层高强度薄钢板的力学性能

牌号	最小屈服强度		最小抗拉强度		2in(50mm)长的最小伸长率①(%)
	ksi	MPa	ksi	MPa	
035A，B，C，S	35	240	②	②	22
035X，Y，Z	35	240	②	②	27
040A，B，C，S	40	280	②	②	20
040X，Y，Z	40	280	②	②	25
045A，B，C，S	45	310	②	②	18
045W	45	310	65	450	22
045X	45	310	55	380	22
045Y	45	310	60	410	22
045Z	45	310	65	450	22
050A，B，C，S	50	340	②	②	16
050X	50	340	60	410	20
050Y	50	340	65	450	20
050Z	50	340	70	480	20

①伸长率取决于试件的几何形状（横截面积）。较厚和较宽的试件会有较高的百分比。 ②一般不用最小抗拉强度。

第四位字母表述了一般的化学成分。字母A仅代表碳和锰；B代表碳、锰和氮；C代表碳、锰和磷，S代表碳、锰及再按生产厂家意愿加上的氮和/或磷；W指的是耐候钢成分，包括硅、磷、铜、镍和铬的不同组合；X指的是HSLA成分，含有铌、铬、铜、钼、镍、硅、钛、钒和锆，可单独或组合加入（如需要还可加入氮和/或磷），并在规定的屈服强度和最小抗拉强度值之间的10ksi（70MPa）范围里延续；Y指的是与X相同的成分，只是在规定的屈服强度和最小抗拉强度值之间的15ksi（100MPa）范围里延续；而Z指的也是与X相同的成分，只是在规定的屈服强度和最小抗拉强度值之间的20ksi（140MPa）范围里延续。

第五位字母表述碳的一般含量。字母H表示最高含碳量，L表示$w(C)$最高为0.13%。第六位字母表述脱氧/硫化物夹杂物控制工艺；字母K表示镇静和晶粒细化的工艺；F表示受控硫化物夹杂物、镇静和使晶粒细化的工艺；而O表示K和F之外的工艺。

高强度薄钢板的AISI代号系统。它包括三种基本组成因素：最小屈服强度、化学成分和脱氧工艺。用五位字母的编码描述这些因素。

前三位数字表示所指牌号的屈服强度。屈服强度的划分为以5ksi（35MPa）为增量从35～60ksi（241～414MPa）、以10ksi（70MPa）为增量从60～80ksi（414～550MPa）、以20ksi（140MPa）为增量从80～140ksi（550～965MPa）和以30ksi（207MPa）为增量从160～190ksi（1100～1310MPa）。故代号中“050”指的是屈服强度为50ksi（345MPa）的钢。

每一种牌号的化学成分都是用字母S、X、W或D分类表示的。字母S表示含有碳加上锰，碳加上锰和磷，碳加上锰和氮，或者碳加上锰、磷和氮的结构特性钢。在消除应力退火钢中，除了那些带有标号X的钢外，其他的都划归入这个型号里。字母X表示的是含有铌、铬、铜、钼、镍、硅、钛、钒和锆的单独或组合的低合金钢牌号。含有不同组合的硅、磷、铜、镍和铬的耐候钢，则用字母W表示。在铁素体基体里，含有马氏体或转变组织的双相钢用字母D标记。双相钢能表现出非常高的变形加工硬化率，因此成形加工的零件的强度比原始平板轧制的薄钢板的要高得多。于是，将双相钢的屈服强度作为经5%的应变后的强度进行标记，例如080D钢经5%的应变后，会具有80ksi（550MPa）的屈服强度。

脱氧工艺也用字母进行分类标记。字母F表示镇静加上硫化物夹杂物控制，O表示未经镇静处理。例如，040SF钢表示最小屈服强度为40ksi（275MPa），

并具有经镇静处理的结构特性。

UNS 代号

统一数码编号系统(UNS)是由 ASTM 和 SAE 及其他有关的技术学会、贸易协会和美国政府机构所开发制订的。作为化学成分代号而不是技术规范的 UNS 数码，是对金属合金的每一种化学成分的指认。本章相关表中的 UNS 代号可供查阅。

UNS 代号由一个字母和五个数字组成。其字母表示合金的大类，数字表示在该大类里的特定合金。现行的代号系统，如钢的 SAE-AISI 系统已融合进 UNS 代号里。例如 UNS 表示碳素钢和合金钢的字头为 G，而前四位数字就是 SAE-AISI 的代号，如 G10400。在 SAE-AISI 系统中间插入的字母 B 和 L 就分别用 1 和 4 作为 UNS 代号中的第五位数字表示，而表示电炉钢的字头 E，则用 UNS 代号的第六位数字 6 标记。在 SAE-AISI 中，由末位字母 H 表示的有淬硬性要求的钢，在 UNS 中用 H*xxxxx* 的系列数标记。在 SAE-AISI 系统中，并未得到标识的碳素钢和合金钢，用字头 K 归类。SAE J1086 和 ASTM527 对 UNS 的代号系统进行了更为详尽的描述。

AMS 代号

由 SAE 颁布的航天航空材料技术规范(AMS)是一般适用于采购的较为完整的技术规范。大部分的 AMS 代号都适用于航空航天用途里的材料，其技术规范所包含的力学性能要求比用于其他用途并有相似化学成分的牌号钢的性能要求严格得多。在 AMS 钢中提出的工艺要求，如自耗电极再熔化也是很常见的。表 2.3-24 和表 2.3-25 列出了以 AMS 牌号表示的碳素钢和合金钢的化学成分。

表 2.3-24　以 AMS 代号表示的钢材的产品类型及其含碳量

AMS 代号	产品类型	含碳量	最接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
5010H	棒材(螺纹切削用坯料)	—	1112	G12120
5020C	棒材，锻件，管材	0.32~0.39①	11L37	G11374
5022K	棒材，锻件，管材	0.14~0.20	1117	G11170
5024F	棒材，锻件，管材	0.32~0.39②	1137	G11370
5032D	线材(退火)	0.18~0.23	1020	G10200
5036G	薄钢板，带钢(镀铝,低碳)	—	—	—
5040H	薄钢板，带钢(深度成形牌号)	0.15max	1010	G10100
5042H	薄钢板，带钢(成形类)	0.15max	1010	G10100
5044F	薄钢板，带钢(中温回火)	0.15max	1010	G10100
5045E	薄钢板，带钢(低温回火)	0.25max	1020	G10200
5046	薄钢板，带钢，厚钢板退火	—	1020	G10200
5047C	薄钢板，带钢(铝镇静,深度成形牌号)	0.08~0.13	1010	G10100
5050H	管材(无缝,退火)	0.15max	1010	G10100
5053F	管材(焊接,退火)	0.15max	1010	G10100
5060F	棒材，锻件，管材	0.13~0.18	1015	G10150
5061D	棒材，线材	低	—	K00802
5062E	棒材，锻件，管材，厚钢板，薄钢板，带钢	低	—	K02508
5069D	棒材，锻件，管材	0.15~0.20	1018	G10180
5070F	棒材，锻件	0.18~0.23	1022	G10220
5075E	管材(无缝,冷拉,应力消除)	0.22~0.28	1025	G10250
5077D	管材(焊接)	0.22~0.28	1025	G10250
50800G	棒材，锻件，管材	0.31~0.38	1035	G10350

（续）

AMS 代号	产品类型	含碳量	最接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
5082D	管材（无缝，冷拉，应力消除）	0.31～0.38	1035	G10350
5085D	厚钢板，薄钢板，带钢（退火）	0.47～0.55	1050	G10500
5110E	线材（碳素钢，弹簧回火，冷拉）	0.75～0.88	1080	G10800
5112H	线材（弹簧特性乐器钢丝，冷拉）	0.70～1.00	1090	G10900
5115F	线材（阀用弹簧特性，淬火并回火）	0.60～0.75	1070	G10700
51201	带钢	0.68～0.80	1074	G10740
5121F	薄钢板，带钢	0.90～1.04	1095	G10950
5122F	带钢（低温回火）	0.90～1.04	1095	G10950
5132G	棒材	0.90～1.30	1095	G10950

①含有1.5%Mn和0.025%Pb（质量分数）。 ②含有1.5%Mn（质量分数）。

表2.3-25 由AMS技术规范规定的合金钢产品类型和成分

AMS 代号	产品类型①	名义化学成分含量（质量分数，%）					最为接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
		C	Cr	Ni	Mo	其他元素		
6250H	棒材，锻件，管材	0.07～0.13	1.5	3.5	—	—	3310	K44910
6255	棒材，锻件，管材（P，DVM）	0.16～0.22	1.45	—	1.0	1.1Si，0.08Al	CBS600	K21940
6256A	棒材，锻件，管材（P，DVM）	0.10～0.16	1.0	3.0	4.5	0.08Al，0.38V	CBS1000M	K71350
6260K	棒材，锻件，管材（渗碳）	0.07～0.13	1.2	3.2	0.12	—	9310	G93106
6263G	棒材，锻件，管材（渗碳牌号，航空用）	0.11～0.17	1.2	3.2	0.12	—	9315	—
6264G	棒材，锻件，管材（渗碳）	0.14～0.20	1.2	3.2	0.12	—	9317	K44414
6265F	棒材，锻件，管材（P，CVM）	0.07～0.13	1.2	3.25	0.12	—	9310	G93106
6266F	棒材，锻件，管材	0.08～0.13	0.50	1.82	0.25	0.003B，0.06V	43BV12	K21028
6267C	棒材，锻件，管材	0.07～0.13	1.2	3.25	0.12	—	9310	G93106
6270L	棒材，锻件，管材	0.11～0.17	0.50	0.55	0.20	—	8615	G86150
6272G	棒材，锻件，管材	0.15～0.20	0.50	0.55	0.20	—	8617	G86170
6274K	棒材，锻件，管材	0.18～0.23	0.50	0.55	0.20	—	8620	G86200
6275E	棒材，锻件，管材	0.15～0.20	0.40	0.45	0.12	0.002B	94B17	G94171
6276F	棒材，锻件，管材（CVM）	0.18～0.23	0.50	0.55	0.2	—	8620	G86200
6277D	棒材，锻件，管材（VAR，ESR）	0.18～0.23	0.50	0.55	0.20	—	8620	G86200
6278	棒材，锻件，管材（用于轴承；P，DVM）	0.11～0.15	4.1	3.4	4.2	12V	—	—
6280G	棒材，锻件，环件	0.28～0.33	0.50	0.55	0.20	—	8630	G86300
6281F	管材（机制）	0.28～0.33	0.5	0.55	0.20	—	8630	G86300
6282F	管材（机制）	0.33～0.38	0.50	0.55	0.25	—	8735	G87350
6290F	棒材，锻件（渗碳）	0.11～0.17	—	1.8	0.25	—	4615	G46150
6292F	棒材，锻件（渗碳）	0.15～0.20	—	1.8	0.25	—	4617	G46170

（续）

AMS 代号	产品类型①	名义化学成分含量(质量分数,%)					最为接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
		C	Cr	Ni	Mo	其他元素		
6294F	棒材，锻件	0.17～0.22	—	1.8	0.25	—	4620	G42600
6299C	棒材，锻件，管材	0.17～0.23	0.50	1.8	0.25	—	4320H	H43200
6300c	棒材，锻件	0.35～0.40	—	—	0.25	—	4037	G40370
6302E	棒材，锻件，管材(低合金,耐热)	0.28～0.33	1.25	—	0.50	0.65Si，0.25V	17-22A(S)	K23015
6303D	棒材，锻件	0.25～0.30	1.25		0.50	0.65Si，0.85V	17-22A(V)	K22770
6304G	棒材，锻件，管材(低合金,耐热)	0.40～0.50	0.95	—	0.55	0.30V	17-22A	K14675
MAM 6304②	棒材，锻件，管材(低合金,耐热)	0.40～0.50	0.95	—	0.55	0.30V	17-22A	K14675
6305A	棒材，锻件，管材(VAR)	0.40～0.50	0.95	—	0.55	0.30V	17-22A	K14675
6308A	棒材，锻件(VAR,ESR)	0.07～0.13	1.0	2.0	3.2	2.0Cu，0.10V，0.90Si	耐热磨合金 53	K71040
6312E	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	—	1.8	0.25	—	4640	K22440
6317E	棒材，锻件(热处理;860MPa 抗拉强度)	0.38～0.43	—	1.8	0.25	—	4640	K22440
6320H	棒材，锻件，环件	0.33～0.38	0.50	0.55	0.25	—	8735	G87350
6321D	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	0.42	0.30	0.12	0.003B	81B40	K03810
6322K	棒材，锻件，环件	0.38～0.43	0.50	0.55	0.25	—	8740	G87400
6323G	管材(机制)	0.38～0.43	0.50	0.55	0.25	—	8740	G87400
6324E	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	0.65	0.70	0.25	—	8740 中度	K11640
6325F	棒材，锻件(热处理;725MPa 抗拉强度)	0.38～0.43	0.50	0.55	0.25	—	8740	G87400
6327G	棒材，锻件(热处理;860MPa 抗拉强度)	0.38～0.43	0.50	0.55	0.25	—	8740	G87400
6328H	棒材，锻件，管材	0.48～0.53	0.50	0.55	0.25	—	8750	K13550
6330D	棒材，锻件，管材	0.33～0.38	0.65	1.25	—	—	3135	K22033
6342G	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	0.80	1.0	0.25	—	9840	G98400
6348A	棒材(正火)	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300
6349A	棒材(正火)	0.38～0.43	0.95	—	0.20	—	4140	G41400
6350G	厚钢板，薄钢板，带钢	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300
6351D	厚钢板，薄钢板，带钢(球化处理)	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300
6352E	厚钢板，薄钢板，带钢	0.33～0.38	0.95	—	0.2	—	4135	G41350
6354C	厚钢板，薄钢板，带钢	0.10～0.17	0.62	—	0.2	0.75Si，0.10Zr	NAX9115-AC	K11914
6355K	厚钢板，薄钢板，带钢	0.28～0.33	0.50	0.55	0.20	—	8630	G86300
6356C	厚钢板，薄钢板，带钢	0.30～0.35	0.95	—	0.20	—	4132	K13247
6357F	厚钢板，薄钢板，带钢	0.33～0.38	0.50	0.5	0.25	—	8735	G87350
6358F	厚钢板，薄钢板，带钢	0.38～0.43	0.50	0.55	0.25	—	8740	G87400
6359E	厚钢板，薄钢板，带钢	0.38～0.43	0.80	1.8	0.25	—	4340	G43400
6360H	管材(无缝,正火或消除应力)	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300

（续）

AMS 代号	产品类型①	名义化学成分含量（质量分数，%）					最为接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
		C	Cr	Ni	Mo	其他元素		
6361B	管材（无缝，圆；860MPa 抗拉强度）	0.28～0.33	0.95	—	0.2	—	4130	G41300
6362C	管材（无缝；1035MPa 抗拉强度）	0.28～0.33	0.95	—	0.2	—	4130	G41300
6365G	管材（无缝，正火或消除应力）	0.33～0.38	0.95	—	0.20	—	4135	G41350
6370J	棒材，锻件，环件	0.28～0.33	0.95	—	0.2	—	4130	G41300
6371G	管材（机制）	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300
6372G	管材（机制）	0.33～0.38	0.95	—	0.20	—	4135	G41350
6373C	管材（焊接）	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300
6378C	棒材（模拉，无切削；895MPa 屈服强度）	0.39～0.48	0.95	—	0.20	0.015Te	4142H	K11542
6379A	棒材（模拉和回火；1140MPa 屈服强度）	0.40～0.53	0.95	—	0.20	0.05Te	4140 中度	G41400
6381D	管材	0.38～0.43	0.95	—	0.20	—	4140	G41400
6382J	棒材，锻件	0.38～0.43	0.95	—	0.20	—	4140	G41400
6385D	厚钢板，薄钢板，带钢	0.27～0.33	1.25	—	0.50	0.65Si，0.25V	17-22A(S)	K23015
6386B(1)	厚钢板，薄钢板（热处理；620 和 690MPa 屈服强度）	0.15～0.21	0.50～0.80	—	0.18～0.28	0.40～0.80Si，0.05～0.15Zr	—	K11856
6386B(2)	厚钢板，薄钢板（热处理；620 和 690MPa 屈服强度）	0.12～0.21	0.40～0.65	—	0.15～0.25	0.20～0.35Si，0.01～0.03Ti，0.03～0.08V，0.0005～0.005B	—	K11630
6386B(3)	厚钢板，薄钢板（热处理；620 和 690MPa 屈服强度）	0.10～0.20	—	—	1.10～1.50	0.15～0.30Si，0.001～0.005B	—	K11511
6386(4)	厚钢板，薄钢板（热处理；620 和 690MPa 屈服强度）	0.13～0.20	0.85～1.20	—	0.15～0.25	0.20～0.40Cu，0.20～0.35Si，0.04～0.10Ti，0.0015～0.005B	—	K11662
6386B(5)	厚钢板，薄钢板（热处理；620 和 690MPa 屈服强度）	0.12～0.21	—	—	0.45～0.70	0.20～0.35Si，0.001～0.005B	—	K11625
6390B	管材（机制，特殊表面特性）	0.38～0.43	0.95	—	0.20	—	4140	G41400
6395C	厚钢板，薄钢板，带钢	0.38～0.43	0.95	—	0.20	—	4140	G41400
6396B	薄钢板，带钢，厚钢板（退火）	0.49～0.55	0.80	1.8	0.25	—	—	K22950
6406C	厚钢板，薄钢板，带钢（退火）	0.41～0.46	2.1	—	0.58	1.6Si，0.05V	X200	K34378
6407D	棒材，锻件，管材	0.27～0.33	1.2	2.05	0.45	—	HS-220	K33020
6408	棒材，锻件，管材（退火，ESR，CVM，VAR，P）	0.35～0.45	5.2	—	1.5	1.0V	—	T20813
6409	棒材，锻件，管材（正火和回火，特性清洁度）	0.38～0.43	0.80	1.8	0.25	—	4340	G43400

（续）

AMS 代号	产品类型①	名义化学成分含量(质量分数,%)					最为接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
		C	Cr	Ni	Mo	其他元素		
6411C	棒材，锻件，管材(CM)	0.28～0.33	0.85	1.8	0.40	—	4330 中度	K23080
6412H	棒材，锻件	0.35～0.40	0.80	1.8	0.25	—	4337	G43370
6413G	管件（机制）	0.35～0.40	0.80	1.8	0.25	—	4337	G43370
6414E	棒材，锻件，管材(CVM)	0.38～0.43	0.80	1.8	0.25	—	4340	G43400
6415L	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	0.80	1.8	0.25	—	4340	G43400
MAM6415②	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	0.80	1.8	0.25	—	4340	G43400
6416B	由 AMS 6419 替代							
6417C	棒材，锻件，管材(CM)	0.38～0.43	0.82	1.8	0.40	1.6Si，0.08V	300M	K44220
6418F	棒材，锻件，管材，环件	0.23～0.28	0.30	1.8	0.40	1.3Mn，1.5Si	Hy-tuf（高强度低合金钢）	K32550
6419C	棒材，锻件，管材(CVM)	0.40～0.45	0.82	1.8	0.40	1.6Si，0.08V	300M	K44220
6421B	棒材，锻件，管材	0.35～0.40	0.80	0.85	0.20	0.003B	98B37 中度	—
6422E	棒材，锻件，管材	0.38～0.43	0.80	0.85	0.20	0.003B	98BV40 中度	K11940
6423C	棒材，锻件，管材	0.40～0.46	0.92	0.75	0.52	0.003B	—	K24336
6424B	棒材，锻件，管材	0.49～0.59	0.80	1.8	0.25	—	—	K22950
6426C	棒材，锻件，管材(CVM)	0.80～0.90	1.0	—	0.58	0.75Si	52CB	K18597
6427G	棒材，锻件，管材	0.28～0.33	0.85	1.8	0.42	0.08V	4330 中度	K23080
6428D	棒材，锻件，管材	0.32～0.38	0.80	1.8	0.35	0.20V	4335 中度	K23477
6429C	棒材，锻件，管材，环件(CVM)	0.33～0.38	0.78	1.8	0.35	0.20V	4335 中度	K33517
6430C	棒材，锻件，管材，环件(特殊牌号)	0.32～0.38	0.78	1.8	0.35	0.20V	4335 中度	K33517
6431G	棒材，锻件，管材(CVM)	0.45～0.50	1.05	0.55	1.0	0.11V	D-6ac	K24728
6432A	棒材，锻件，管材	0.43～0.49	1.05	0.55	1.0	0.12V	D-6a	K24728
6433C	厚钢板，薄钢板，带钢(特殊牌号)	0.33～0.38	0.80	1.8	0.35	0.20V	4335 中度	K33517
6434C	厚钢板，薄钢板，带钢	0.33～0.38	0.78	1.8	0.35	0.20V	4335 中度	K33517
6435C	厚钢板，薄钢板，带钢（P,CM,退火）	0.33～0.38	0.78	1.8	0.35	0.20V	4335 中度	K33517
6436B	厚钢板，薄钢板，带钢（低合金,热处理,退火）	0.25～0.30	1.25	—	0.50	0.65Si，0.85V	17-22A(V)	K22770
6437D	厚钢板，薄钢板，带钢	0.38～0.43	5.0	—	1.3	0.5V	H-11	T20811
6438C	厚钢板，薄钢板，带钢（P,CM)	0.45～0.50	1.05	0.55	1.0	0.11V	D-6ac	K24728
6439B	厚钢板，薄钢板，带钢(退火,CVM)	0.42～0.48	1.05	0.55	1.0	0.12V	D-6ac	K24729
6440J	棒材，锻件，管材(用于轴承)	0.98～1.10	1.45	—	—	—	52100	G52986
6441G	由 AMS 6440 替代							

（续）

AMS 代号	产品类型[①]	名义化学成分含量（质量分数，%）					最为接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
		C	Cr	Ni	Mo	其他元素		
6442E	棒材，锻件（用于轴承）	0.98～1.10	0.50	—	—	—	50100	G50986
6443E	棒材，锻件，管材（CVM）	0.98～1.10	1.0	—	—	—	51100	G51986
6444G	棒材，线材，锻件，管件（P，CVM）	0.98～1.10	1.45	—	—	—	52100	G52986
6445E	棒材，线材，锻件，管件（CVM）	0.92～1.02	1.05	—	—	1.1Mn	51100 中度	K22097
6446C	棒材，锻件（ESR）	0.98～1.10	1.00	—	—	—	—	51100
6447C	棒材，锻件，管材（ESR）	0.98～1.10	1.45	—	—	—	52100	G52986
6448F	棒材，锻件，管材	0.48～0.53	0.95	—	—	0.22V	6150	G61500
6449C	棒材，锻件，管材（用于轴承）	0.98～1.10	1.0	—	—	—	51100	G51986
6450E	线材（弹簧）	0.48～0.53	0.95	—	—	0.22V	6150	G61500
6451A	线材，弹簧（油回火）	0.51～0.59	0.65	—	—	1.4Si	9254	G92540
6454	薄钢板，带钢，厚钢板（P，CM）	0.38～0.43	0.80	1.8	0.25	—	4340	G43400
6455F	厚钢板，薄钢板，带钢	0.48～0.53	0.95	—	—	0.22V	6150	G61500
6470H	棒材，锻件，管材（氮化）	0.38～0.43	1.6	—	0.35	1.1Al	135 中度	K24065
6471C	棒材，锻件，管材（氮化，CVM）	0.38～0.43	1.6	—	0.35	1.2Al	135 中度	K24065
6472B	棒材，锻件（氮化，热处理；770MPa 抗拉强度）	0.38～0.43	1.6	—	0.35	1.1Al	135 中度	K24065
6475E	棒材，锻件，管材（氮化）	0.21～0.26	1.1	3.5	0.25	1.25Al	—	K52355
6485	棒材，锻件	0.38～0.43	5.0	—	1.3	0.50V	H-11	T20811
6487	棒材，锻件（P，CVM）	0.38～0.43	5.0	—	1.3	0.50V	H-11	T20811
6488D	棒材，锻件（P）	0.38～0.43	5.0	—	1.3	0.50V	H-11	T20811
6490D	棒材，锻件，管材（用于轴承；P，CVM）	0.77～0.85	4.0	—	4.2	1.0V	M-50	T11350
6491A	棒材，锻件，管材（用于轴承；P，DVM）	0.80～0.85	4.1	—	4.2	1.0V	M-50	T11350
6512B	棒材，锻件，管材，环件（退火）	—	—	18	4.9	7.8Co，0.40Ti，0.10Al	高强度热处理 250	K92890
6514B	棒材，锻件，管材，环件（退火，CM）	—	—	18.5	4.9	9.0Co，0.65Ti，0.10Al	高强度热处理 300	K93120
6518A	薄钢板，带钢，厚钢板（固溶处理，DVM）	—	—	19.0	3.0	0.10Al，1.4Ti	—	—
6519A	棒材，锻件，管材，弹簧（退火，DVM）	—	—	19.0	3.0	0.10Al，1.4Ti	—	—
6520B	厚钢板，薄钢板，带钢（固溶处理，CM）	—	—	18	4.9	7.8Co，0.40Ti，0.10Al	高强度热处理 250	K92890
6521A	厚钢板，薄钢板，带钢（固溶处理，CM）	—	—	18.5	4.9	9.0Co，0.65Ti，0.10Al	高强度热处理 300	K93120
6522	厚钢板（P，VM）	—	2.0	10.0	1.0	14.0Co	AF 1410	K92571
6523C	薄钢板，带钢，厚钢板（退火，CVM）	0.17～0.23	0.75	9.0	1.0	0.09V，4.5Co	HP9-4-20	K91472
6524B	薄钢板，带钢，厚钢板（退火，CVM）	0.29～0.34	1.0	7.5	1.0	0.09V，4.5Co	HP9-4-30	K91283

（续）

AMS 代号	产品类型①	名义化学成分含量(质量分数,%)					最为接近的 SAE-AISI 代号	UNS 代号
		C	Cr	Ni	Mo	其他元素		
6525A	棒材，锻件，管材，环件(CVM)	0.17～0.23	0.75	9.0	1.0	0.09V，4.5Co	HP9-4-20	K91283
6526C	棒材，锻件，管材，环件(退火 d,CVM)	0.29～0.34	1.0	7.5	1.0	4.5Co，0.09V	HP9-4-30	K91313
6527	棒材，锻件(P,VM)	0.13～0.17	2.0	10.0	1.0	14Co	AF1410	K92571
6528	棒材(正火,特殊航空特性清洁度)	0.28～0.33	0.95	—	0.20	—	4130	G41300
6529	棒材(正火,特殊航空特性清洁度)	0.38～0.43	0.95	—	0.20	—	4140	G41400
6530H	管件(无缝)	0.28～0.33	0.55	0.50	0.20	—	8630	G86300
6535G	管件(无缝)	0.28～0.33	0.50	0.55	0.20	—	8630	G86300
6543A	棒材，锻件(固溶处理,DVM)	0.10～0.14	2.0	10.0	1.0	8.0Co	—	K91970
6544A	厚钢板(固溶处理,VM)	0.10～0.14	2.0	10.0	1.0	8.0Co	—	K92571
6546C	厚钢板，薄钢板，带钢(退火,P,CM)	0.24～0.30	0.48	8.0	0.48	4.0Co，0.09V	HP9-4-25	K91122
6550H	管件(焊接)	0.28～0.33	0.55	0.50	0.20	—	8630	G86300

①P，优质；CVM，自耗真空电弧重熔；ESR，电渣炉重熔；DVM，双真空熔化；VAR，真空电弧重熔；CM，自耗电极重熔；VM，真空熔化。 ②MAM，米制航天材料的技术规范。

ASTM(ASME)代号

如前所述，钢材产品应用的最广泛的标准技术规范还是由 ASTM 颁布的，它们是完整的技术规范，通常适用于采购。许多 ASTM 技术规范应用于特定的产品，如 A 574 用于合金钢的内六角螺钉。这些技术规范一般都针对用于制造的终端产品性能，而且用于制造终端产品的钢都有相当大的化学成分范围。

ASTM 技术规范代表了钢材产品在生产商、技术条件制定者、加工人员以及用户之间所达成的一致意见。在很多情况下，ASTM 技术规范中的尺寸、公差、各种极限值和适用范围与 AISI 钢材产品手册中相应的标准工艺条目都是相同的。美国机械工程师协会(ASME)不加修改或只作很少修改地采用 ASTM 的许多技术规范。ASME 使用字头“S”和 ASTM 的代号来表示这些技术规范。例如 ASME SA 213 和 ASTM A 213 是相同的。

钢材产品可以按照其遵照生产的 ASTM 技术规范的编码进行鉴别。其编码是由字母“A”（表示铁质材料)跟另外选的一组按序列命名的数码构成。但是所引用的技术规范编码未必总能完全表述其钢材产品。例如，A 434 是用于表示经热处理(淬火和回火)的合金钢棒材的技术规范。为完整地表述以该技术规范所表示的棒材，必须还标明其牌号(在所举的例子里,即 SAE-AISI 代号)和等级(所要求的强度等级)。作为 A 434 的参考文献还包含了两个试验方法的标准和棒材产品的要求 A 29。

正常情况下，用于棒材、线材和锻件坯料的 ASTM 的技术规范中，包含了用于表示碳素钢和合金钢化学成分的 SAE-AISI 代号。薄钢板产品的一些 ASTM 技术规范也包括 SAE-AISI 用于化学成分的代号。用于厚钢板和结构型材的 ASTM 技术规范一般都对化学成分的极限值和范围直接作出规定，而不用 SAE-AISI 代号。在表 2.3-26 中列出了一些 ASTM 的技术规范，这些规范中包含了用于不同牌号钢材化学成分的 SAE-AISI 代号。

表 2.3-26 包含 SAE-AISI 代号的 ASTM 技术规范

ASTM 技术规范	标 题	ASTM 技术规范	标 题
A29	碳素钢和合金钢，热轧和冷精轧	A295	高碳-铬钢球和滚子轴承钢
A108	标准特性冷精轧碳素钢棒材	A304	有淬硬性要求的合金钢棒材

（续）

ASTM 技术规范	标 题	ASTM 技术规范	标 题
A322	热轧合金钢棒材	A548	冷镦头特性的碳素钢钢丝，用于自攻或金属薄钢板螺钉
A331	冷精轧合金钢棒材		
A434	热轧或冷精轧淬火和回火合金钢棒材	A549	冷镦头特性的碳素钢钢丝，用于木螺钉
A505	热轧和冷精轧合金钢薄钢板和带钢	A575	商用特性的热轧碳素钢棒材
A506	常规特性的热轧和冷轧合金钢薄钢板和带钢	A576	特种热轧碳素钢棒材
A507	冲压特性的热轧和冷轧合金薄钢板和带钢	A646	优质合金钢初轧坯和方坯，用于航空和航天的锻件
A510	碳素钢盘条和粗圆线材	A659	商用特性的热轧碳素钢薄钢板和带钢
A534	用于抗摩擦轴承的渗碳钢	A682	冷轧弹簧特性的通用碳素带钢
A535	特种球和滚子轴承钢	A684	未经回火的冷轧高碳带钢
A544	无屑螺母特性碳素钢钢丝	A711	用于锻件的碳素钢和合金钢初轧坯、方坯和扁坯
A545	冷镦头特性的碳素钢钢丝，用于螺纹的切削加工	A713	高碳弹簧钢丝，用于经热处理的零件
A546	冷镦头特性的中高强度碳素钢钢丝，用于六角头螺钉	A752	合金钢盘条和粗轧圆钢丝
		A827	用于锻件及类似用途的碳素钢厚钢板
A547	冷镦头特性的中高强度合金钢钢丝，用于六角头螺钉	A829	结构特性的合金钢厚钢板
		A830	结构特性的碳素钢厚钢板

通用技术规范。有很多ASTM技术规范，如A 29所包含的一般性技术要求对于一个大类中的每一种钢材产品都能通用。表2.3-27所列的技术要求就是其中的一部分，这要求还常必须要用描述特定的轧制方式或中间制品的其他一些技术规范予以补充。

薄钢板产品。表2.3-28列出了由ASTM技术规范所规定的碳钢薄钢板产品的化学成分极限值和范围，该规范并不包含SAE-AISI代号。而在表2.3-26中列出了用于薄钢板产品的ASTM技术规范，它们却包含有SAE-AISI代号。

表2.3-27 通用ASTM技术规范

ASTM 技术规范①	标 题	ASTM 技术规范①	标 题
A6/A6M	轧制结构钢厚钢板、型材、薄钢板、桩钢和棒材的通用技术要求	A505	热轧和冷轧合金钢的薄钢板和带钢的通用技术要求
A20/A20M	压力容器用厚钢板的通用技术要求	A530/A530M	特种碳素钢管和合金钢管的通用技术要求
A29/A29M	热锻及冷精轧的碳素钢和合金钢棒材的通用技术要求		
A450/A450M	碳素钢管、铁素体-合金钢管及奥氏体合金钢管的通用技术要求	A682	弹簧用冷轧高碳带钢的通用技术要求

①尾部字母“M”表示该技术规范有米制版本可供使用。

表2.3-28 普通碳素钢薄钢板和带钢(ASTM技术规范)的化学成分范围和极限值

ASTM 技术规范	表述①	化学成分②(质量分数,%)				
		C	Mn	P	S	其他
A611	CR SQ 牌号A，B，C，E	0.20	0.60	0.04	0.04	③
	牌号D(型号1)	0.20	0.90	0.04	0.04	③
	牌号D(型号2)	0.15	0.60	0.20	0.04	③

（续）

ASTM 技术规范	表述①	化学成分②（质量分数,%）				
		C	Mn	P	S	其他
A 366	CR CQ	0.15	0.60	0.35	0.04	③
A 109	CR 带钢 回火 1，2，3	0.25	0.60	0.035	0.04	—
	回火 4，5	0.15	0.60	0.035	0.04	③
A619	CR DQ	0.10	0.50	0.025	0.035	—
A620	CR DQSK	0.10	0.50	0.025	0.035	④
A570	HR SQ 牌号 30，33，36 和 40	0.25	0.90	0.04	0.05	③
	牌号 45，50 和 55	0.25	1.35	0.04	0.05	③
A569	HR CQ	0.15	0.60	0.035	0.040	③
A621	HR OQ	0.10	0.50	0.025	0.035	—
A622	HR OQSK	0.10	0.50	0.025	0.035	④
A414	压力容器牌号 A	0.15	0.90	0.035	0.040	③
	牌号 B	0.22	0.90	0.035	0.040	③
	牌号 C	0.25	0.90	0.035	0.040	③
	牌号 D	0.25	1.20	0.035	0.040	③⑤
	牌号 E	0.27	1.20	0.035	0.040	③⑤
	牌号 F	0.31	1.20	0.035	0.040	③⑤
	牌号 G	0.31	1.35	0.035	0.040	③⑤

①CR，冷轧；HR，热轧；SQ，结构特性；DQSK，冲压特性，特殊镇静；CQ，商用特性。 ②所有均为最大值。 ③作为含铜钢，其中 $w(\mathrm{Cu})$ 最低为 0.20%。 ④铝作为脱氧剂，通常在产品中超过 0.010%（质量分数）。 ⑤可以向制造商提出要求供应牌号从 D 到 G 的要求。当规定为硅镇静钢时，则应当供应其中 $w(\mathrm{Si})$ 为 0.15%~0.30% 的钢。

厚钢板和结构型材。用于厚钢板和结构型材的 ASTM 技术规范一般不包含 SAE-AISI 代号。表 2.3-29 列出了用于碳素钢和合金结构厚钢板的化学成分的极限值及范围。

压力容器用厚钢板。用于制造压力容器的厚钢板除了要满足用于与结构用途相类似的要求外，还必须符合不同的技术规范。两种技术规范之间的主要不同在于，压力容器厚钢板必须满足缺口冲击韧度的要求，并且对于表面和边缘所允许有的缺陷有更为严格的限制。用于压力容器的碳素钢和合金钢厚钢板的化学成分的极限值和范围如表 2.3-30 所示。

表 2.3-29 合金钢或碳素钢结构厚钢板的化学成分 ASTM 技术规范

ASTM 规范	材料牌号或型号	化学成分①（质量分数,%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
合金钢											
A514	A	0.15 ~ 0.21	0.80 ~ 1.10	0.035	0.04	0.40 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	—	0.18 ~ 0.28	—	Zr，0.05 ~ 0.15；B，0.0025
	B	0.12 ~ 0.21	0.70 ~ 1.00	0.035	0.04	0.20 ~ 0.35	0.40 ~ 0.65	—	0.15 ~ 0.25	—	V，0.03 ~ 0.08；Ti，0.01 ~ 0.03；B，0.0005 ~ 0.005

（续）

ASTM规范	材料牌号或型号	化学成分[①]（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
合金钢											
A514	C	0.10～0.20	1.10～1.50	0.035	0.04	0.15～0.30	—	—	0.15～0.30	—	B，0.001～0.005
	E	0.12～0.20	0.40～0.70	0.035	0.04	0.20～0.40	1.40～2.00	—	0.40～0.60	—	Ti，0.01～0.10[②]；B，0.001～0.005
	F	0.10～0.20	0.60～1.00	0.035	0.04	0.15～0.35	0.40～0.65	0.70～1.00	0.40～0.60	0.15～0.50	V，0.03～0.08；B，0.0005～0.006
	H	0.12～0.21	0.95～1.30	0.035	0.04	0.20～0.35	0.40～0.65	0.30～0.70	0.20～0.30	—	V，0.03～0.08；B，0.0005～0.005
	J	0.12～0.21	0.45～0.70	0.035	0.04	0.20～0.35	—	—	0.50～0.65	—	B，0.001～0.005
	M	0.12～0.21	0.45～0.70	0.035	0.04	0.20～0.35	—	1.20～1.50	0.45～0.60	—	B，0.001～0.005
	P	0.12～0.21	0.45～0.70	0.035	0.04	0.20～0.35	0.85～1.20	1.20～1.50	0.45～0.60	—	B，0.001～0.005
	Q	0.14～0.21	0.95～1.30	0.035	0.04	0.15～0.35	1.00～1.50	1.20～1.50	0.40～0.6	—	V，0.03～0.08
	R	0.15～0.80	0.85～1.15	0.035	0.04	0.20～0.35	0.35～0.65	0.90～1.10	0.15～0.25	—	V，0.03～0.08
	S	0.10～0.20	1.10～1.50	0.035	0.04	0.15～0.35	—	—	0.10～0.35	—	B，0.001～0.005；Nb，0.06最高[③]
	T	0.08～0.14	1.20～1.50	0.035	0.010	0.40～0.60	—	—	0.45～0.60	—	V，0.03～0.08；B，0.001～0.005
A709	100，100W	（相当于A514-A，B，C，E，F，H，J，M，P，Q）									
A710	A	0.07	0.40～0.70	0.025	0.025	0.40	0.60～0.90	0.70～1.00	0.15～0.25	1.00～1.30	Nb，0.02最低
	B	0.06	0.40～0.65	0.025	0.025	0.15～0.40	—	1.20～1.50	—	1.00～1.30	Nb，0.02最低
	C	0.07	1.30～1.65	0.25	0.25	0.04	—	0.70～1.00	0.15～0.25	1.00～1.30	Nb，0.02最低
碳素钢											
A36	—	0.29[④]	0.80～1.20[④]	0.04	0.05	0.15～0.40[④]	—	—	—	0.20[⑤]	—

（续）

ASTM规范	材料牌号或型号	化学成分①（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
碳素钢											
A131	A	0.26④	⑥	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—
	B	0.21	0.80～1.10⑦	0.04	0.04	0.3	—	—	—	—	—
	D	0.21	0.70～1.35④⑦	0.04	0.04	0.10～0.35	—	—	—	—	—
	E	0.18	0.70～1.35⑦	0.04	0.04	0.10～0.35	—	—	—	—	—
	CS，DS	0.16	1.00～1.35⑦	0.04	0.04	0.10～0.35	—	—	—	—	—
A283	A	0.14	0.90	0.04	0.05	0.04④	—	—	—	0.20⑤	—
	B	0.17	0.90	0.04	0.05	0.04④	—	—	—	0.20⑤	—
	C	0.24	0.90	0.04	0.05	0.04④	—	—	—	0.20⑤	—
	D	0.27	0.90	0.04	0.05	0.04④	—	—	—	0.20⑤	—
A284	C	0.36④	0.90	0.04	0.05	0.15～0.40	—	—	—	—	—
	D	0.35④	0.90	0.04	0.05	0.15～0.40	—	—	—	—	—
A529	—	0.27	1.20	0.04	0.05	—	—	—	—	0.20⑤	—
A573	58	0.23	0.60～0.90⑦	0.04	0.05	0.10～0.35	—	—	—	—	—
	65	0.26④	0.85～1.20	0.04	0.05	0.15～0.40	—	—	—	—	—
	70	0.28④	0.85～1.20	0.04	0.05	0.15～0.40	—	—	—	—	—
A678	A	0.16	0.90～1.50	0.04	0.05	0.15～0.50	0.25	0.25	0.08	0.20⑤～0.35	—
	B	0.20	0.70～1.60④	0.04	0.05	0.15～0.50	0.25	0.25	0.08	0.20⑤～0.35	—
	C	0.22	1.00～1.60	0.04	0.05	0.20～0.50	0.25	0.25	0.08	0.20⑤～0.35	—
A709	36	0.27④	0.80～1.20④	0.04	0.05	0.15～0.40④	—	—	—	—	—

①当所示为一个数值即为最大极限值，但铜例外，为最小值。 ②钒可以部分或全部由钛一对一地进行替代。 ③钛的含量可达0.06%以保护硼的加入。 ④极限值随厚钢板厚度而变化。 ⑤若规定为含铜钢则仅适用最小值。 ⑥厚度超过13mm（1/2in）的厚钢板应有最低不少于2.5倍碳含量的锰含量。 ⑦按照熔炼分析只要C+1/6Mn不超过0.40%，锰的上限就可以超过。

表 2.3-30　合金钢或碳素钢压力容器用厚钢板化学成分的 ASTM 技术规范

ASTM 规范	材料牌号或型号	化学成分①(质量分数,%)									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
碳素钢											
A285	A	0.17	0.90	0.035	0.04	—	—	—	—	—	—
	B	0.22	0.90	0.035	0.04	—	—	—	—	—	—
	C	0.28	0.90	0.035	0.04	—	—	—	—	—	—
A299	—	0.30②	0.90~1.50②	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
A442	55	0.24②	0.80~1.10②	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	60	0.27②	0.80~1.10②	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
A455	—	0.33	0.85~1.20	0.035	0.04	0.10	—	—	—	—	—
A515	55	0.28②	0.90	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	60	0.31②	0.90	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	65	0.33②	0.90	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	70	0.35②	1.20	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
A516	55	0.26②	0.60~1.20②	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	60	0.27②	0.60~1.20②	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	65	0.29②	0.85~1.20	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	70	0.31②	0.85~1.20	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
A537	等级1，2	0.24	0.70~1.60②	0.035	0.04	0.15~0.50	0.25	0.25	0.08	0.35	—
A562	—	0.12	1.20	0.035	0.04	0.15~0.50	—	—	—	0.15 最低	Ti 最低，4×C
A612	—	0.29②	1.00~1.50②	0.035	0.04	0.15~0.50②	0.25	0.25	0.08	0.35	V，0.08
A662	A	0.14	0.90~1.35	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	B	0.19	0.85~1.50	0.035	0.04	0.15~0.40	—	—	—	—	—
	C	0.20	1.00~1.60	0.035	0.04	0.15~0.50	—	—	—	—	—
A724	A	0.18	1.00~1.60	0.035	0.04	0.55	0.25	0.25	0.08	0.35	V，0.08
	B	0.20	1.00~1.60	0.035	0.04	0.50	0.25	0.25	0.08	0.35	V，0.08
	C	0.22	1.10~1.60	0.035	0.04	0.20~0.60	0.25	0.25	0.08	0.35	B，0.005；V，0.008
A78	A	0.24	1.60②	0.035	0.04	0.15~0.50	0.25	0.50	0.08	0.35	—
	B	0.20	0.90~1.50	0.030	0.025	0.15~0.55	0.25	0.25	0.08	0.35	V，0.08
	C	0.20	1.60②	0.030	0.025	0.15~0.55	0.25	0.25	0.08	0.35	V，0.08
合金钢											
A202	A	0.17	1.05~1.40	0.035	0.040	0.60~0.90	0.35~0.60	—	—	—	—
	B	0.25	1.05~1.40	0.035	0.040	0.60~0.90	0.35~0.60	—	—	—	—

（续）

ASTM规范	材料牌号或型号	化学成分①（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
合金钢											
A203	A	0.23②	0.80②	0.035	0.040	0.15~0.40	—	2.10~2.50	—	—	—
	B	0.25②	0.80②	0.035	0.040	0.15~0.40	—	2.10~2.50	—	—	—
	D	0.20②	0.80②	0.035	0.040	0.15~0.40	—	3.25~3.75	—	—	—
	E，F	0.23②	0.80②	0.035	0.040	0.15~0.40	—	3.25~3.75	—	—	—
A204	A	0.25②	0.90	0.035	0.040	0.15~0.40	—	—	0.45~0.60	—	—
	B	0.27②	0.90	0.035	0.040	0.15~0.40	—	—	0.45~0.60	—	—
	C	0.28②	0.90	0.035	0.040	0.15~0.40	—	—	0.45~0.60	—	—
A225	C	0.25	1.60	0.035	0.040	0.15~0.40	—	0.40~0.70	—	—	V，0.13~0.18
	D	0.20	1.70	0.035	0.040	0.10~0.50	—	0.40~0.70	—	—	V，0.10~0.18
A302	A	0.25②	0.95~1.30	0.035	0.040	0.15~0.40	—	—	0.45~0.60	—	—
	B	0.25②	1.15~1.50	0.035	0.040	0.15~0.40	—	—	0.45~0.60	—	—
	C	0.25②	1.15~1.50	0.035	0.040	0.15~0.40	—	0.40~0.70	0.45~0.60	—	—
	D	0.25②	1.15~1.50	0.035	0.040	0.15~0.40	—	0.70~1.00	0.45~0.60	—	—
A353	—	0.13	0.90	0.035	0.040	0.15~0.40	—	8.50~9.50	—	—	—
A387	2	0.21	0.55~0.80	0.035	0.040	0.15~0.40	0.50~0.80	—	0.45~0.60	—	—
	5	0.15	0.30~0.60	0.040	0.030	0.50	4.00~6.00	—	0.45~0.65	—	—
	7	0.15	0.30~0.60	0.030	0.030	1.00	6.00~8.00	—	0.45~0.65	—	—

（续）

ASTM规范	材料牌号或型号	化学成分①（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
合金钢											
A387	9	0.15	0.30~0.60	0.030	0.030	1.00	8.00~10.00	—	0.90~1.10	—	—
	11	0.17	0.40~0.65	0.035	0.040	0.50~0.80	1.00~1.50	—	0.45~0.65	—	—
	12	0.17	0.40~0.65	0.035	0.040	0.15~0.40	0.80~1.15	—	0.45~0.60	—	—
	21	0.15②	0.30~0.60	0.035	0.035	0.50	2.75~3.25	—	0.90~1.10	—	—
	22	0.15②	0.30~0.60	0.035	0.035	0.50	2.00~2.50	—	0.90~1.10	—	—
	91	0.08~0.12	0.30~0.60	0.020	0.010	0.20~0.50	8.00~9.50		0.85~1.05	—	V，0.18~0.25；Nb，0.06~0.10；N，0.03~0.07；Al，0.04
A517	A	0.15~0.21	0.80~1.10	0.035	0.040	0.40~0.80	0.50~0.80	—	0.18~0.28	—	B，0.0025
	B	0.15~0.21	0.70~1.00	0.035	0.040	0.20~0.35	0.40~0.65	—	0.15~0.25	—	B，0.0005~0.005
	C	0.10~0.20	1.10~1.50	0.035	0.040	0.15~0.30	—	—	0.20~0.30	—	B，0.001~0.005
	E	0.12~0.20	0.40~0.70	0.035	0.040	0.20~0.35	1.40~2.00	—	0.40~0.60	—	B，0.0015~0.005
	F	0.10~0.20	0.60~1.00	0.035	0.040	0.15~0.35	0.40~0.65	0.70~1.00	0.40~0.60	—	B，0.0005~0.006
	H	0.12~0.21	0.95~1.30	0.035	0.040	0.20~0.35	0.40~0.65	0.30~0.70	0.20~0.30	—	B，0.0005
	J	0.12~0.21	0.45~0.70	0.035	0.040	0.20~0.35	—	—	0.50~0.65	—	B，0.001~0.005
	M	0.12~0.21	0.45~0.70	0.035	0.040	0.20~0.35	—	1.20~1.50	0.45~0.60	—	B，0.001~0.005
	P	0.12~0.21	0.45~0.70	0.035	0.040	0.20~0.35	0.85~1.20	1.20~1.50	0.45~0.60	—	B，0.001~0.005

（续）

ASTM规范	材料牌号或型号	化学成分[①]（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
合金钢											
A517	Q	0.14～0.21	0.95～1.30	0.035	0.040	0.15～0.35	1.00～1.50	1.20～1.50	0.40～0.60	—	V，0.03～0.08
	S	0.10～0.20	1.10～1.50	0.035	0.040	0.15～0.40	—	—	0.10～0.35	—	Ti，0.06；Nb，0.06
	T	0.08～0.14	1.20～1.50	0.035	0.010	0.40～0.60	—	—	0.45～0.60	—	B，0.001～0.005；V，0.03～0.08
A533	A	0.25	1.15～1.50	0.035	0.040	0.15～0.40	—	—	0.45～0.60	—	—
	B	0.25	1.15～1.50	0.035	0.040	0.15～0.40	—	0.40～0.70	0.45～0.60	—	—
	C	0.25	1.15～1.50	0.035	0.040	0.15～0.40	—	0.70～1.00	0.45～0.60	—	—
	D	0.25	1.15～1.50	0.035	0.040	0.15～0.40	—	0.20～0.40	0.45～0.60	—	—
A542	A	0.15	0.30～0.60	0.025	0.025	0.50	2.00～2.50	0.40	0.90～1.10	0.40	V，0.03
	B	0.11～0.15	0.30～0.60	0.025	0.15	0.50	2.00～2.50	0.25	0.90～1.10	0.25	V，0.02
	C	0.10～0.15	0.30～0.60	0.025	0.025	0.13	2.75～3.25[⊖]	0.25	0.90～1.10	0.25	V，0.2～0.3；Ti，0.015～0.035；B，0.001～0.003
A543	B	0.23	0.40	0.035	0.040	0.20～0.40	1.50～2.00	2.60～3.25[②]	0.45～0.60	—	V，0.03
	C	0.23	0.40	0.020	0.020	0.20～0.40	1.20～1.80	2.25～3.25[②]	0.45～0.60	—	V，0.03
A553	I	0.13	0.90	0.035	0.040	0.15～0.40	—	8.50～9.50	—	—	—
	II	0.13	0.90	0.035	0.040	0.15～0.40	—	7.50～8.50	—	—	—
A645	—	0.13	0.30～0.60	0.025	0.025	0.20～0.40	—	4.75～5.25	0.20～0.35	—	Al，0.02～0.12；N，0.020

⊖ 原文为325，疑有误。——译者注。

（续）

ASTM规范	材料牌号或型号	化学成分①（质量分数，%）									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	其他
合金钢											
A734	A	0.12	0.45～0.75	0.035	0.015	0.40	0.90～1.20	0.90～1.20	0.25～0.40	—	Al，0.06
A735	—	0.06	1.20～2.20②	0.04	0.025	0.40	—	—	0.23～0.47	0.20～0.35③	Nb，0.03～0.09
A736	A	0.07	0.40～0.70	0.025	0.025	0.40	0.60～0.90	0.70～1.00	0.15～0.25	1.00～1.30	Nb，0.02min
	C	0.07	1.30～1.65	0.025	0.025	0.40	—	0.70～1.00	0.15～0.25	1.00～1.30	Nb，0.02min
A782	—	0.20	0.70～1.20	0.035	0.040	0.40～0.80	0.50～1.00	—	0.20～0.60	—	Zr，0.04～0.12
A832	—	0.10～0.15	0.30～0.60	0.025	0.025	0.10	2.75～3.25	—	0.90～1.10	—	V，0.20～0.30；Ti，0.015～0.035；B，0.001～0.003
A844	—	0.13	0.90	0.020	0.020	0.15～0.40	—	8.50～9.50	—	—	—

①当所示为单一数值时，即为最大极限值，除非另有注明为最小值。 ②极限值随厚钢板厚度而变化。 ③当有规定。

国际代号和技术规范

大部分工业化国家都有颁布关于钢材代号和规范的标准化组织。包括美国的美国国家标准协会（ANSI）和在比利时布鲁塞尔的欧洲标准化委员会（CEN）在内的这些组织，可以帮助工程师对照不同国家的钢材。后者是由欧盟的18个国家以及欧洲自由贸易协会的国家标准化组织所组成的协会。本文所采摘的参考文献包括：

- A.S. Melilli, Ed., *Comparative World Steel Standards*, ASTM, 1996.
- D.L. Potts and J.G. Gensure, *International Metallic Materials Cross-Reference*, Genium Publishing, 1989.
- C.W. Wegst, Ed., *Stahlschlüssel: Key to Steel*, 18th ed., Verlag Stahlschlüssel, 1998.
- *Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels*, 3rd., ASM International, 1992.

第2节 碳素钢和合金钢的力学性能

性能。碳素钢和合金钢的性能取决于化学成分、工艺和显微组织之间的关系。本节的重点在于（合金）成分的影响。工艺和显微组织的作用将在本手册第2篇第1章里讨论。

在一般的（即普通碳素钢）钢里加入合金元素，是为了改善其热形变加工过程（热处理或热力学工艺）中的特性，以此再反过来提高钢的力学和物理性能。特别是要以下面中的一个或多个的需要加入合金元素：

- 提高抗拉强度，而不降低其伸长率。
- 提高韧性。
- 提高淬硬性，这样超乎异常大的截面的普通碳素钢无需用太高的冷却速率也能淬硬，以此减少产生有害的变形和淬火裂纹。

- 在高温下保持强度。
- 提高耐磨性。
- 使钢的晶粒细化。

从词义上可以看出，合金元素与残留元素之间的差别，后者并不是有意加入到钢中的，而是由原材料和生产所采用的炼钢工艺而留下的。任何一种元素不是合金元素就是残留元素，例如有些镍或铬是通过合金废钢进入到钢中的，故可以认为是残留的，然而无论这些元素如何进入的，只要能满足其成分范围的需要都可认为是合金元素。

无论合金元素还是残留元素都能通过钢的生产、冶炼对最终产品及其使用性能产生深远的影响。一种元素对钢所产生的作用会受其他元素存在的影响，这种相互间的影响是很复杂的。此外，若一种特定元素的影响对于钢的一个方面是有益的，则可能在其他方面是有害的。

合金元素的作用

通常在碳素钢和低合金钢中发现的各种合金元素的一般作用总结如下。这些元素的成分极限值和范围都已列入本章第 1 节中的有关表格里。有关合金元素对钢性能影响的进一步内容可以查阅本章其他有关章节(例如,见第 12 节 ~ 第 14 节)以及本篇第 6 章、第 7 章的有关内容。

碳。这是钢里最重要的单一合金元素。它对于渗碳体(和其他碳化物)、珠光体、球状渗碳体(铁素体基体中的一种球状碳化物的集合体)、贝氏体和铁-碳马氏体的形成是必不可少的。由上述一种或多种组分构成的显微组织能提供范围很广的力学性能和加工特性。通过热处理可以控制这些元素的相对含量及其分布，并以此改变特定钢工件的显微组织以及其性能。大多数的钢铁冶金技术都应用于铁碳合金的不同组织及其转变上，可以说许多其他元素很大程度也只是在其铁-碳系统上发挥作用。

假定将具有各不相同的显微组织的钢种进行比较，它们的强度和硬度随含碳量的增加而提高，而韧性和塑性却随含碳量的增加而降低(其加工性、焊接性和切削性也应含碳量的增加而变差)。图 2.3-1 所示是含碳量对力学性能的影响。随着钢的含碳量增加并达到 w(C)最大值约为 0.6%，其铁-碳马氏体的硬度也因含碳量的增加而提高。含碳量的增加还会提高其淬硬性。

成品钢材所要求的含碳量决定了炼制得到的钢的型号。沸腾钢含碳量的增加会使其表面质量下降。w(C)约为 0.15%~0.30% 的镇静钢的表面

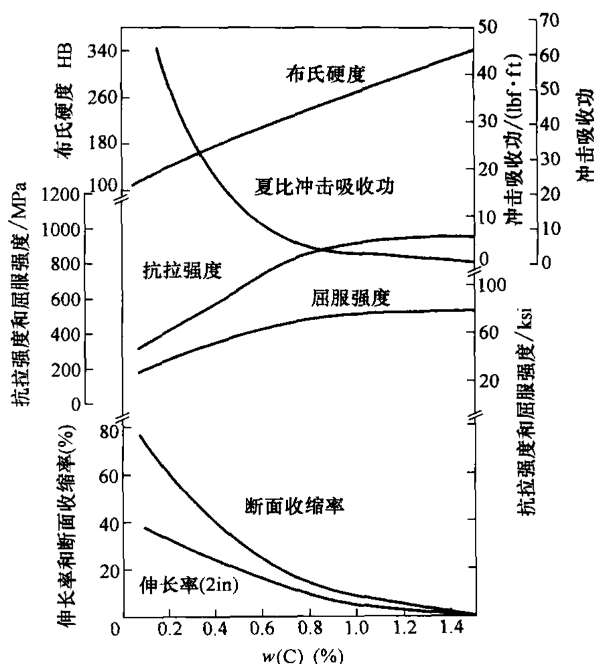


图 2.3-1 直径为 25mm 轧制试件的力学性能随含碳量的变化

质量比较差，它要求特殊的工艺才能获得与比上述含碳量更高或更低的钢相似的表面质量。碳具有中等的偏析趋势，碳的偏析往往比其他元素的偏析更为显著。

锰。通常所有市场供应的钢材里都含有锰。在钢的冶炼中，锰是很重要的，因为它用于对钢液进行脱碳，并且适合钢的热形变加工以降低其对热脆性的敏感度。锰还能与硫生成硫化锰的细脉，以此可改善钢的切削性能。它有利于强度和硬度的提高，但其程度不如碳，而且提高的量取决于含碳量。锰对提高钢的淬硬性有很大的效果。

锰对于产生宏观偏析的作用小于任何一种常用元素。w(Mn)超过 0.60% 的钢很难进行沸腾。锰还有益于提高所有各种含碳量的钢的表面质量(除了特别低碳的沸腾钢以外)。

硅。它是炼钢用的主要脱氧剂之一。它在钢中的含量不一定在化学成分的规范中注明，而是取决于产品所规定的脱氧工艺。沸腾钢和压盖钢含有最低限度的硅含量，w(Si)通常低于 0.05%。全镇静钢为脱氧，一般 w(Si)为 0.15%~0.30%，如果还含有其他脱氧剂，则钢中的硅含量可以减少。硅仅有很少的偏析可能。低碳钢里的硅一般不利于表面质量，而且这种情况对于低碳加硫牌号的钢来说，更为明显。

硅能够稍微提高一些铁素体的强度，但不会引起塑性的大幅度下降。较高的含硅量可以增加钢在空气(温度可高达260℃或500℉)中的抗氧化能力，并且能减少磁滞损失。这类高硅钢一般处理起来较为困难。

铜。它有中等的偏析趋向，达到相当含量则有害于钢的热形变加工工艺。铜对于锻焊有着负面的影响，但还不至于严重影响电弧焊和氧炔焊。作为对表面质量的不利因素，铜会增加加硫钢所原有的表面缺陷。然而当 $w(Cu)$ 超过0.20%时，会有助于提高其在大气中的耐腐蚀性，超过该含铜量的钢也称之为耐候钢。

铬。将铬加入钢中，通常用于增强耐腐蚀性和耐氧化性、提高淬硬性、改善其高温强度或增强高碳成分钢的耐磨料磨损性。铬是很强的碳化物形成物。复杂的铬-铁碳化物会缓慢地溶入奥氏体里，在淬火之前必须有足够的加热时间。

铬可以作为硬化元素使用，并常与提高韧性的元素，如镍一起使用，以此产生超力学性能。铬能在较高的温度下提高强度，它一般也能与钼一起使用，而达到同样的目的。

镍。当在结构钢里作为合金元素使用时，它是铁素体的强化剂。由于镍并不在钢里形成任何碳化物类的化合物，而是在铁素体里保持溶解状态，以此增加铁素体相的强度和韧性。镍钢比较容易进行热处理，因为它能降低其临界冷却速率。镍和铬的联合使用可生成比碳素钢所能达到的更高的淬硬性、冲击强度及耐疲劳性。镍合金还具有超级的低温强度和韧性。

钼。钼能增加钢的淬硬性，并且当要把这种淬硬性保持在规定的限度之内时，更显得特别有用。这种元素特别在其含量(质量分数)为0.15%~0.30%时，可以将钢的回火脆性降低到最低限度。含有钼的淬硬钢必须在较高的温度里进行回火，以便获得有相同的软化效果。就把钢的高温抗拉强度和抗蠕变极限所能提高到的程度而言，钼是独一无二的。它延缓奥氏体转变为铁素体的能力远超过它延缓奥氏体转变为贝氏体的能力，于是贝氏体能在含钼钢的连续冷却过程中生成。

钒。它是强的碳化物形成元素之一。它在铁素体里的溶解达到一定程度就能赋予强度和韧性。钒钢比由相似成分而不含有钒的钢能展现更细的组织。钒在淬火以前溶入奥氏体里还能提高其淬硬性，对回火产生二次淬火的效果，以及提高热硬性。

铌。少量的铌可以提高碳素钢的屈服强度，并以较小的程度提高其抗拉强度。加入 $w(Nb)$ 为0.20%的铌能够将中碳钢的屈服强度提高70~100MPa(10~15ksi)。在这种强度提高的同时，其缺口冲击韧度会减弱很多，除非在热轧时采取特殊方法以细化其晶粒。热轧过程中的晶粒细化包括特殊的形变热处理技术，如控制轧制工艺、以低温精轧作为最终压制工序，以及轧制完成后的加速冷却。

铝。它被作为脱氧剂广泛应用，用于控制晶粒的大小。当以规定的量加入钢中时，它能控制在重新加热过程中的奥氏体生长。在所有的元素中，铝在淬火之前控制晶粒的大小是最有效的。钛、锆和钒都是有效的晶粒长大抑制剂，但是对于需要进行热处理(淬火和回火)的结构牌号钢，这三种元素会对淬硬性产生负面的影响，因为它们的碳化物十分稳定，故很难在淬火之前溶解到奥氏体里面去。

硼。将其加入完全镇静钢以改善淬硬性。硼处理钢是按 $w(B)$ 为0.0005%~0.003%的含量范围生产的。凡要用硼部分代替其他合金元素时都应考虑这样做仅仅是为了淬硬性，因为降低合金含量对一些用途可能是不利的。硼对于含碳量较低的碳素钢是最有效的。

钛。主要用作脱氧剂，并在完全镇静钢里抑制晶粒的生长。钛可以加入硼钢里，因为它易于稳固地结合钢中的氧和氮，以此在增加钢的淬硬性方面提高硼的效能。

钨。用于提高硬度并促进晶粒组织的细化，而且具有极佳的耐热性。在高温下，钨会形成非常硬且稳定的碳化钨。碳化钨有助于防止钢在回火过程中软化。钨广泛应用于高速工具钢里。

锆。它能抑制晶粒的生长并且作为脱氧剂应用于镇静钢里。其主要用途是在高强度低合金钢(HSLA)中改善其热轧性。溶解了的锆还能稍微提高其淬硬性。

钙。有时用来对钢进行脱氧。在HSLA中，它有助于控制非金属夹杂物的形状，以此提高韧性。以钙脱氧的钢，一般比用硅或铝脱氧的钢有更好的切削性能。

铅。它有时是在浇铸的过程中通过机械弥散的方式加入碳素钢和合金钢里的，以达到改善钢的切削特性的目的。为此，其加入量(质量分数)一般为0.15%~0.35%。

在浇铸过程中铅并不能溶解入钢里，但能保持非常微小的球状形态，以此提高韧性和强度。在接近铅熔点的温度下，它会造成液态金属的脆化。

氮。它能增加钢的强度、硬度和切削性，但是会降低塑性和韧性。氮会在铝镇静钢中形成用于控制钢

的晶粒大小的氮化铝颗粒，以改善韧性和强度。氮还能减小硼对钢淬硬性的影响。

残留元素的影响

上面所述的任何合金元素都会随炼钢所用的原材料而有意无意地存在钢里。这样就可以将它们认为是"残留元素"。由于这些元素可能会对最终产品产生不必要的影响，所以大部分的钢厂主要通过按照合金含量对废钢进行仔细分选，以便将它们在钢中的含量降低到最低限度。

还有几种一般都作为不需要的杂质来考虑的其他元素，可能来自于生铁。然而为了某些特殊原因，它们可以被特意留在里面，这时也可将它们看成为合金元素。

磷。它可以提高钢的强度和硬度，但是会严重降低塑性和韧性。它还会增加中碳合金钢特别是单纯铬钢对于回火脆性的敏感度。审慎地在钢里加入一些磷，可提高其切削性和耐腐蚀性。

硫。硫含量的增加会降低横向伸长性和缺口冲击韧性，但对于纵向的力学性能仅有很小的影响。随着硫含量的增加，焊接性能也会下降。这种元素对表面质量是非常有害的，尤其对于低碳钢和低锰钢。为此，大部分钢只规定其上限含量。但也有例外就是易切削的一类钢，硫的加入可以提高切削性能，这时需要规定含量的范围（见本手册第4篇第6章"显微组织和切削性"一节）。硫具有比其他一般元素更大的偏析倾向。硫在钢中主要呈现为硫化夹杂物的形式。显然，对于加硫的牌号钢，这类杂质产生的可能性更大。

氧。它在沸腾钢中是最有可能出现的，并能稍微提高一些钢的强度，但会严重降低其韧性。

氢。在冶炼过程中，溶解于钢的氢会严重地增加其脆性。这种效果与因电镀或酸洗造成的脆性是不同的。在冶炼过程中，氢溶解于钢所造成的脆性会使钢在从热轧温度冷却下来的过程中发生表面剥落。溶解的氢对于轧制成品很少会有什么影响，因为钢在热成形以前的再度加热退火可以把几乎所有的氢排除。有关氢影响钢的性能更详细的内容可参阅本手册（下册）第5篇第1章。

锡。会引发钢对回火脆性和热脆性的敏感性。

砷和锑。也会增加钢对回火脆性的敏感性。

碳素钢和合金钢的性能

碳素钢。影响普通碳素钢的主要因素有碳的含量和显微组织。控制和引发显微组织的变化需要一定的工艺规范，而借助于特定的工艺规范可形成具有特征性能范围的各种显微组织。工艺技术不仅取决于显微组织还可应用于调整最终的显微组织。例如，薄钢板的成形能力取决于低碳冷轧、退火钢的单相铁素体组织，而高碳淬火钢的高强度、高耐磨性的提高则借助于各种精心形成的、在其细晶粒奥氏体里的马氏体中存在着的非常细微碳化物的显微组织（进一步详细的阐述可参阅第2篇第1章）。

除了含碳量和显微组织的这些显著影响之外，普通碳素钢的性能还能通过除碳、锰、硅、磷和硫以外的其他残留元素的作用得以改善，这些伴随而来的元素来自于废钢、脱氧剂或炉子的耐火材料。碳素钢的性质还受到所存在的气体特别是氧、氮和氢及其反应物的影响。这些气体的含量很大程度上取决于熔化、脱氧和浇注的工艺。因此碳素钢的最终性能还是受其生产中所采用的工艺的影响。

于是，制约普通碳素钢性能的因素主要为含碳量和显微组织以及由化学成分、最终所采用的轧制、锻造或热处理等工序所决定的显微组织；其次为钢的残留合金、非金属和气体的含量，而这些又是由炼钢工艺所决定的。

图2.3-1所示是当显微组织和晶粒大小保持在合理不变的条件下时，含碳量的一般性影响。对于热轧薄钢板和带钢产品而言，这些数据也是有代表性的。如图2.3-1所示，硬度、抗拉强度、屈服强度随含碳量的增加而提高，而伸长率、断面收缩率和夏比冲击值却随其增加而急剧降低。表2.3-31和表2.3-32所示是含碳量和热处理两者对碳素钢性能的影响。

表2.3-31 所挑选的碳素钢和合金钢在热轧、正火和退火条件下的力学性能

AISI 代号[①]	处理	奥氏体化温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
		℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
1015	轧制后	—	—	420.6	61.0	313.7	45.5	39.0	61.0	126
	经正火	925	1700	424.0	61.5	324.1	47.0	37.0	69.6	121
	经退火	870	1600	386.1	56.0	284.4	41.3	37.0	69.7	111

（续）

AISI 代号①	处　理	奥氏体化温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
		℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
1020	轧制后	—	—	448.2	65.0	330.9	48.0	36.0	59.0	143
	经正火	870	1600	441.3	64.0	346.5	50.3	35.8	67.9	131
	经退火	870	1600	394.7	57.3	294.8	42.8	36.5	66.0	111
1022	轧制后	—	—	503.3	73.0	358.5	52.0	35.0	67.0	149
	经正火	925	1700	482.6	70.0	358.5	52.0	34.0	67.5	143
	经退火	870	1600	429.2	62.3	317.2	46.0	35.0	63.6	137
1030	轧制后	—	—	551.6	80.0	344.7	50.0	32.0	57.0	179
	经正火	925	1700	520.6	75.5	344.7	50.0	32.0	60.8	149
	经退火	845	1550	463.7	67.3	341.3	49.5	31.2	57.9	126
1040	轧制后	—	—	620.5	90.0	413.7	60.0	25.0	50.0	201
	经正火	900	1650	589.5	85.5	374.0	54.3	28.0	54.9	170
	经退火	790	1450	518.8	75.3	353.4	51.3	30.2	57.2	149
1050	轧制后	—	—	723.9	105.0	413.7	60.0	20.0	40.0	229
	经正火	900	1650	748.1	108.5	427.5	62.0	20.0	39.4	217
	经退火	790	1450	636.0	92.3	365.4	53.0	23.7	39.9	187
1060	轧制后	—	—	813.6	118.0	482.6	70.0	17.0	34.0	241
	经正火	900	1650	775.7	112.5	420.6	61.0	18.0	37.2	229
	经退火	790	1450	625.7	90.8	372.3	54.0	22.5	38.2	179
1080	轧制后	—	—	965.3	140.0	586.1	85.0	12.0	17.0	293
	经正火	900	1650	1010.1	146.5	524.0	76.0	11.0	20.6	293
	经退火	790	1450	615.4	89.3	375.8	54.5	24.7	45.0	174
1095	轧制后	—	—	965.3	140.0	572.3	83.0	9.0	18.0	293
	经正火	900	1650	1013.5	147.0	499.9	72.5	9.5	13.5	293
	经退火	790	1450	656.7	95.3	379.2	55.0	13.0	20.6	192
1117	轧制后	—	—	486.8	70.6	305.4	44.3	33.0	63.0	143
	经正火	900	1650	467.1	67.8	303.4	44.0	33.5	63.8	137
	经退火	855	1575	429.5	62.3	279.2	40.5	32.8	58.0	121
1118	轧制后	—	—	521.2	75.6	316.5	45.9	32.0	70.0	149
	经正火	925	1700	477.8	69.3	319.2	46.3	33.5	65.9	143
	经退火	790	1450	450.2	65.3	284.8	41.3	34.5	66.8	131
1137	轧制后	—	—	627.4	91.0	379.2	55.0	28.0	61.0	192
	经正火	900	1650	668.8	97.0	396.4	57.5	22.5	48.5	197
	经退火	790	1450	584.7	84.8	344.7	50.0	26.8	53.9	174
1141	轧制后	—	—	675.7	98.0	358.5	52.0	22.0	38.0	192
	经正火	900	1650	706.7	102.5	405.4	58.8	22.7	55.5	201
	经退火	815	1500	598.5	86.8	353.0	51.2	25.5	49.3	163

（续）

AISI代号[①]	处理	奥氏体化温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度HB
		℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
1144	轧制后	—	—	703.3	102.0	420.6	61.0	21.0	41.0	212
	经正火	900	1650	667.4	96.8	399.9	58.0	21.0	40.4	197
	经退火	790	1450	584.7	84.8	346.8	50.3	24.8	41.3	167
1340	经正火	870	1600	836.3	121.3	558.5	81.0	22.0	62.9	248
	经退火	800	1475	703.3	102.0	436.4	63.3	25.5	57.3	207
3140	经正火	870	1600	891.5	129.3	599.8	87.0	19.7	57.3	262
	经退火	815	1500	689.5	100.0	422.6	61.3	24.5	50.8	197
4130	经正火	870	1600	668.8	97.0	436.4	63.3	25.5	59.5	197
	经退火	865	1585	560.5	81.3	360.6	52.3	28.2	55.6	156
4140	经正火	870	1600	1020.4	148.0	655.0	95.0	17.7	46.8	302
	经退火	815	1500	655.0	95.0	417.1	60.5	25.7	56.9	197
4150	经正火	870	1600	1154.9	167.5	734.3	106.5	11.7	30.8	321
	经退火	815	1500	729.5	105.8	379.2	55.0	20.2	40.2	197
4320	经正火	895	1640	792.9	115.0	464.0	67.3	20.8	50.7	235
	经退火	850	1560	579.2	84.0	609.5	61.6	29.0	58.4	163
4340	经正火	870	1600	1279.0	185.5	861.8	125.0	12.2	36.3	363
	经退火	810	1490	744.6	108.0	472.3	68.5	22.0	49.9	217
4620	经正火	900	1650	574.3	83.3	366.1	53.1	29.0	66.7	174
	经退火	855	1575	512.3	74.3	372.3	54.0	31.3	60.3	149
4820	经正火	860	1580	75.0	109.5	484.7	70.3	24.0	59.2	229
	经退火	815	1500	681.2	98.8	464.0	67.3	22.3	58.8	197
5140	经正火	870	1600	792.9	115.0	472.3	68.5	22.7	59.2	229
	经退火	830	1525	572.3	83.0	293.0	42.5	28.6	57.3	167
5150	经正火	870	1600	870.8	126.3	529.5	76.8	20.7	58.7	255
	经退火	825	1520	675.7	98.0	357.1	51.8	22.0	43.7	197
5160	经正火	855	1575	957.0	138.8	530.9	77.0	17.5	44.8	269
	经退火	815	1495	722.6	104.8	275.8	40.0	17.2	30.6	197
6150	经正火	870	1600	939.8	136.3	615.7	89.3	21.8	61.0	269
	经退火	815	1500	667.4	96.8	412.3	59.8	23.0	48.4	197
8620	经正火	915	1675	632.9	91.8	357.1	51.8	26.3	59.7	183
	经退火	870	1600	536.4	77.8	385.4	55.9	31.3	62.1	149
8630	经正火	870	1600	650.2	94.3	429.5	62.3	23.5	53.5	187
	经退火	845	1550	564.0	81.8	372.3	54.0	29.0	58.9	156
8650	经正火	870	1600	1023.9	148.5	688.1	99.8	14.0	40.4	302
	经退火	795	1465	715.7	103.8	386.1	56.0	22.5	46.4	212

（续）

AISI 代号①	处理	奥氏体化温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
		℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
8740	经正火	870	1600	929.4	134.8	606.7	88.0	16.0	47.9	269
	经退火	815	1500	695.0	100.8	415.8	60.3	22.2	46.4	201
9255	经正火	900	1650	932.9	135.3	579.2	84.0	19.7	43.4	269
	经退火	845	1550	774.3	112.3	486.1	70.5	21.7	41.1	229
9310	经正火	890	1630	906.7	131.5	570.9	82.8	18.8	58.1	269
	经退火	845	1550	820.5	119.0	439.9	63.8	17.3	42.1	241

注：数据所用试件的直径为12.8mm(0.505in)，用25mm(1in)的圆钢切削而成的。

①所有的牌号均为细晶粒，1100系列牌号的为粗晶粒的除外。经热处理的试件用油淬火，除非另有注明。

表2.3-32 所挑选的碳素钢和合金钢在淬火和回火条件下的力学性能

AISI 代号①	回火温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
1030②	205	400	848	123	648	94	17	47	495
	315	600	800	116	621	90	19	53	401
	425	800	731	106	579	84	23	60	302
	540	1000	669	97	517	75	28	65	255
	650	1200	586	85	441	64	32	70	207
1040②	205	400	896	130	662	96	16	45	514
	315	600	889	129	648	94	18	52	444
	425	800	841	122	634	92	21	57	352
	540	1000	779	113	593	86	23	61	269
	650	1200	669	97	496	72	28	68	201
1040	205	400	779	113	593	86	19	48	262
	315	600	779	113	593	86	20	53	255
	425	800	758	110	552	80	21	54	241
	540	1000	717	104	490	71	26	57	212
	650	1200	634	92	434	63	29	65	192
1050②	205	400	1124	163	807	117	9	27	514
	315	600	1089	158	793	115	13	36	444
	425	800	1000	145	758	110	19	48	375
	540	1000	862	125	655	95	23	58	293
	650	1200	717	104	538	78	28	65	235
1050	205	400	—	—	—	—	—	—	—
	315	600	979	142	724	105	14	47	321
	425	800	938	136	655	95	20	50	277
	540	1000	876	127	579	84	23	53	262
	650	1200	738	107	469	68	29	60	223

（续）

AISI 代号[①]	回火温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
1060	205	400	1103	160	779	113	13	40	321
	315	600	1103	160	779	113	13	40	321
	425	800	1076	156	765	111	14	41	311
	540	1000	965	140	669	97	17	45	277
	650	1200	800	116	524	76	23	54	229
1080	205	400	1310	190	979	142	12	35	388
	315	600	1303	189	979	142	12	35	388
	425	800	1289	187	951	138	13	36	375
	540	1000	1131	164	807	117	16	40	321
	650	1200	889	129	600	87	21	50	255
1095[②]	205	400	1489	216	1048	152	10	31	601
	315	600	1462	212	1034	150	11	33	534
	425	800	1372	199	958	139	13	35	388
	540	1000	1138	165	758	110	15	40	293
	650	1200	841	122	586	85	20	47	235
1095	205	400	1289	187	827	120	10	30	401
	315	600	1262	183	813	118	10	30	375
	425	800	1213	176	772	112	12	32	363
	540	1000	1089	158	676	98	15	37	321
	650	1200	896	130	552	80	21	47	269
1137	205	400	1082	157	938	136	5	22	352
	315	600	986	143	841	122	10	33	285
	425	800	876	127	731	106	15	48	262
	540	1000	758	110	607	88	24	62	229
	650	1200	655	95	483	70	28	69	197
1137[②]	205	400	1496	217	1165	169	5	17	415
	315	600	1372	199	1124	163	9	25	375
	425	800	1103	160	986	143	14	40	311
	540	1000	827	120	724	105	19	60	262
	650	1200	648	94	531	77	25	69	187
1141	205	400	1634	237	1213	176	6	17	461
	315	600	1462	212	1282	186	9	32	415
	425	800	1165	169	1034	150	12	47	331
	540	1000	896	130	765	111	18	57	262
	650	1200	710	103	593	86	23	62	217

（续）

AISI 代号[①]	回火温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度HB
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
1144	205	400	876	127	627	91	17	36	277
	315	600	869	126	621	90	17	40	262
	425	800	848	123	607	88	18	42	248
	540	1000	807	117	572	83	20	46	235
	650	1200	724	105	503	73	23	55	217
1330[②]	205	400	1600	232	1455	211	9	39	459
	315	600	1427	207	1282	186	9	44	402
	425	800	1158	168	1034	150	15	53	335
	540	1000	876	127	772	112	18	60	263
	650	1200	731	106	572	83	23	63	216
1340	205	400	1806	262	1593	231	11	35	505
	315	600	1586	230	1420	206	12	43	453
	425	800	1262	183	1151	167	14	51	375
	540	1000	965	140	827	120	17	58	295
	650	1200	800	116	621	90	22	66	252
4037	205	400	1027	149	758	110	6	38	310
	315	600	951	138	765	111	14	53	295
	425	800	876	127	731	106	20	60	270
	540	1000	793	115	655	95	23	63	247
	650	1200	696	101	421	61	29	60	220
4042	205	400	1800	261	1662	241	12	37	516
	315	600	1613	234	1455	211	13	42	455
	425	800	1289	187	1172	170	15	51	380
	540	1000	986	143	883	128	20	59	300
	650	1200	793	115	689	100	28	66	238
4130[②]	205	400	1627	236	1462	212	10	41	467
	315	600	1496	217	1379	200	11	43	435
	425	800	1282	186	1193	173	13	49	380
	540	1000	1034	150	910	132	17	57	315
	650	1200	814	118	703	102	22	64	245
4140	205	400	1772	257	1641	238	8	38	510
	315	600	1551	225	1434	208	9	43	445
	425	800	1248	181	1138	165	13	49	370
	540	1000	951	138	834	121	18	58	285
	650	1200	758	110	655	95	22	63	230

（续）

AISI 代号[①]	回火温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度HB
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
4150	205	400	1931	280	1724	250	10	39	530
	315	600	1765	256	1593	231	10	40	495
	425	800	1517	220	1379	200	12	45	440
	540	1000	1207	175	1103	160	15	52	370
	650	1200	958	139	841	122	19	60	290
4340	205	400	1875	272	1675	243	10	38	520
	315	600	1724	250	1586	230	10	40	486
	425	800	1469	213	1365	198	10	44	430
	540	1000	1172	170	1076	156	13	51	360
	650	1200	965	140	855	124	19	60	280
5046	205	400	1744	253	1407	204	9	25	482
	315	600	1413	205	1158	168	10	37	401
	425	800	1138	165	931	135	13	50	336
	540	1000	938	136	765	111	18	61	282
	650	1200	786	114	655	95	24	66	235
50B46	205	400	—	—	—	—	—	—	560
	315	600	1779	258	1620	235	10	37	505
	425	800	1393	202	1248	181	13	47	405
	540	1000	1082	157	979	142	17	51	322
	650	1200	883	128	793	115	22	60	273
50B60	205	400	—	—	—	—	—	—	600
	315	600	1882	273	1772	257	8	32	525
	425	800	1510	219	1386	201	11	34	435
	540	1000	1124	163	1000	145	15	38	350
	650	1200	896	130	779	113	19	50	290
5130	205	400	1613	234	1517	220	10	40	475
	315	600	1496	217	1407	204	10	46	440
	425	800	1275	185	1207	175	12	51	379
	540	1000	1034	150	938	136	15	56	305
	650	1200	793	115	689	100	20	63	245
5140	205	400	1793	260	1641	238	9	38	490
	315	600	1579	229	1448	210	10	43	450
	425	800	1310	190	1172	170	13	50	365
	540	1000	1000	145	862	125	17	58	280
	650	1200	758	110	662	96	25	66	235

（续）

AISI 代号[①]	回火温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度HB
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
5150	205	400	1944	282	1731	251	5	37	525
	315	600	1737	252	1586	230	6	40	475
	425	800	1448	210	1310	190	9	47	410
	540	1000	1124	163	1034	150	15	54	340
	650	1200	807	117	814	118	20	60	270
5160	205	400	2220	322	1793	260	4	10	627
	315	600	1999	290	1772	257	9	30	555
	425	800	1606	233	1462	212	10	37	461
	540	1000	1165	169	1041	151	12	47	341
	650	1200	896	130	800	116	20	56	269
51B60	205	400	—	—	—	—	—	—	600
	315	600	—	—	—	—	—	—	540
	425	800	1634	237	1489	216	11	36	460
	540	1000	1207	175	1103	160	15	44	355
	650	1200	965	140	869	126	20	47	290
6150	205	400	1931	280	1689	245	8	38	538
	315	600	1724	250	1572	228	8	39	483
	425	800	1434	208	1331	193	10	43	420
	540	1000	1158	168	1069	155	13	50	345
	650	1200	945	137	841	122	17	58	282
81B45	205	400	2034	295	1724	250	10	33	550
	315	600	1765	256	1572	228	8	42	475
	425	800	1407	204	1310	190	11	48	405
	540	1000	1103	160	1027	149	16	53	338
	650	1200	896	130	793	115	20	55	280
8630	205	400	1641	238	1503	218	9	38	465
	315	600	1482	215	1392	202	10	42	430
	425	800	1276	185	1172	170	13	47	375
	540	1000	1034	150	896	130	17	54	310
	650	1200	772	112	689	100	23	63	240
8640	205	400	1862	270	1669	242	10	40	505
	315	600	1655	240	1517	220	10	41	460
	425	800	1379	200	1296	188	12	45	400
	540	1000	1103	160	1034	150	16	54	340
	650	1200	896	130	800	116	20	62	280

（续）

AISI 代号[①]	回火温度		抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度 HB
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			
86B45	205	400	1979	287	1641	238	9	31	525
	315	600	1696	246	1551	225	9	40	475
	425	800	1379	200	1317	191	11	41	395
	540	1000	1103	160	1034	150	15	49	335
	650	1200	903	131	876	127	19	58	280
8650	205	400	1937	281	1675	243	10	38	525
	315	600	1724	250	1551	225	10	40	490
	425	800	1448	210	1324	192	12	45	420
	540	1000	1172	170	1055	153	15	51	340
	650	1200	965	140	827	120	20	58	280
8660	205	400	—	—	—	—	—	—	580
	315	600	—	—	—	—	—	—	535
	425	800	1634	237	1551	225	13	37	460
	540	1000	1310	190	1213	176	17	46	370
	650	1200	1068	155	951	138	20	53	315
8740	205	400	1999	290	1655	240	10	41	578
	315	600	1717	249	1551	225	11	46	495
	425	800	1434	208	1358	197	13	50	415
	540	1000	1207	175	1138	165	15	55	363
	650	1200	986	143	903	131	20	60	302
9255	205	400	2103	305	2048	297	1	3	601
	315	600	1937	281	1793	260	4	10	578
	425	800	1606	233	1489	216	8	22	477
	540	1000	1255	182	1103	160	15	32	352
	650	1200	993	144	814	118	20	42	285
9260	205	400	—	—	—	—	—	—	600
	315	600	—	—	—	—	—	—	540
	425	800	1758	255	1503	218	8	24	470
	540	1000	1324	192	1131	164	12	30	390
	650	1200	979	142	814	118	20	43	295
94B30	205	400	1724	250	1551	225	12	46	475
	315	600	1600	232	1420	206	12	49	445
	425	800	1344	195	1207	175	13	57	382
	540	1000	1000	145	931	135	16	65	307
	650	1200	827	120	724	105	21	69	250

注：数据所用试件的直径为12.8mm(0.505in)，是用直径为25mm(1in)的圆钢切削而成的。
①所有的牌号均为细晶粒，1100系列牌号的为粗晶粒的除外。经热处理的试件用油淬火，除非另有注明。　②水淬。

合金钢。以 SAE-AISI 代号所表示的合金钢无法直接通过冶炼获得所规定的性能，通常还要经热处理才能达到所要求的性能。这些钢在轧制、正火或退火状态下就具有为低强度用途所需的性能。只有在正火和回火或淬火和回火的条件下及经过能产生优化结果的后续热处理，才能得到高强度的数值。表 2.3-31 和表 2.3-32 所示是热处理对 SAE-AISI 碳素钢和合金钢性能的影响。在本章的后续章节里，将讨论按照规定的力学性能要求所生产的钢的性能。

第3节　薄钢板、带钢和厚钢板

低碳钢薄钢板和带钢

低碳钢的薄钢板和带钢主要应用于消费性用品。这些用途要求材料能在广泛的不同条件下使用，而且特别要适用于可大批量、低成本的生产，并能制成具有漂亮外观的物件。因此，这些产品必须在不同程度上满足下列要求的不同组合：易于制造、适当的强度、优良的精加工性能，以便通过制造得到诱人的外观和与其他材料及不同的涂层及其工艺的兼容性。

用于这类产品的钢材可以在很大的范围里满足其对于化学成分的要求，然而绝大部分都是选择用于制成冲压件的非合金类低碳钢，例如汽车车身和器件。作为这些用途的一般化学成分(质量分数)为0.03%~0.10%C、0.15%~0.50% Mn、0.035% P(最高)和0.04%S(最高)。

一般都使用沸腾钢(或加盖钢)铸造钢锭，因为其价格便宜。近来这些钢更为连续浇铸的镇静钢所替代。连续浇铸工艺本身很适合于镇静钢的生产。对于需要防止应变时效和/或有特殊成形性要求的还是要首选含铝的镇静钢，而无论其采用何种浇铸或制造方法。关于炼钢和脱氧工艺可参阅本篇第 2 章。

薄钢板和带钢在宽度上的差别取决于轧制工艺。应当指出的是，在市场上都可以采购到定尺寸的或卷材的薄钢板和带钢。普通碳素带钢的标准尺寸公差比薄钢板的更为严格。表 2.3-33 所示是普通碳素钢薄钢板和带钢的标准尺寸范围。在表 2.3-34、表 2.3-35 中列出了这些产品不同特性的一般特征。

薄钢板和带钢的生产

大部分的冷轧低碳钢薄钢板可以分为两类(表 2.3-34)。型号1(回火轧制)适用于表面外观比较重要的，且其规定的表面平整度要求必须满足的用途。型号2 是一种用于外观不太重要的产品。冷轧低碳带钢可以按照从特硬到特软分为五个硬度回火范围(表 2.3-36)。

表 2.3-33　低碳薄钢板和带钢的标准尺寸

产品	厚度		宽度		其他限制	技术规范的符号(ASTM 编号)	
	mm	in	mm	in		米制	英制
热轧薄钢板	1.2~6.0	0.045~0.230 含	>300~1200 含	>12~48 含	卷材和定尺钢板	A569M, A621M, 或 A622M	A569, A621, 或 A622
	1.2~4.5	0.45④~0.180 含	>1200	>48	卷材和定尺钢板	A569M, A621M, 或 A622M	A569, A621, 或 A622
	6.0~12.5	0.230~0.500 含	>300~1200 含	>12~48 含	仅卷材	A635M	A635
	4.5~12.5	0.180~0.500 含	>1200~1800 含	>48~72 含	仅卷材	A635M	A635
热轧带钢	1.2~5.0	0.45④~0.203 含	≤200	≤6	卷材和定尺钢板	A569M, A621M, 或 A622M	A569, A621, 或 A622
	1.2~6.0	0.045~0.229 含	>200~300 含	>6~12 含	卷材和定尺钢板	A569M, A621M, 或 A622M	A569, A621, 或 A622
	6.0~12.5	0.230~0.500 含	>200~300 含	>8~12 含	仅卷材	A635M	A635

（续）

产品	厚度		宽度		其他限制	技术规范的符号(ASTM 编号)	
	mm	in	mm	in		米制	英制
冷轧薄钢板	0.35 ~2.0	0.014 ~ 0.082 含	>50 ~300 含	>2 ~12 含	①	A366M，A619M，或 A620M	A366，A619，或 A620
冷轧薄钢板	≥0.35	>0.014	>300	>12	②	A366M，A619M，或 A620M	A366，A619，或 A620
冷轧带钢	≤6.0	≤0.250	>12 ~600 含	>0.50 ~ 23.9 含	③	A109M	A109

含：指包括。

①按成本考虑，冷轧薄钢板、卷材和定尺薄钢板均由较宽的并仅有切边、厚度为 0.356 ~2.08mm(0.014 ~0.082in)及 w(C)为 0.25%(最高)的卷材裁切而成。 ②若没有特殊的边缘和表面粗糙度(即不是无光、光亮或抛光)要求和/或不要求用宽度小于 610mm(24in)的单机轧制。 ③按成本考虑，当由较宽的并仅有单切边及 w(C)为 0.25%(最高)卷材裁切而成的宽度为 51 ~305mm(2 ~12in)及厚度为 0.356 ~2.08mm(0.014 ~0.082in)的钢板，均按薄钢板归类。 ④原文如此，但似为 0.045 之误——译者注。

表 2.3-34 热轧和冷轧普通碳素钢薄钢板和带钢的型号一览表

特性或回火	适用技术规范编号	SAE-AISI 牌号命名	表面质量			
			回火-轧制，用于外露零件①		最后退火，用于不外露零件①	
			描述	符号	描述	符号
热轧薄钢板						
商业特性	A569，A635	1008 ~1012	经轧制(黑)	A	经轧制(黑)	A
			酸洗-干燥	P	酸洗-干燥	P
			酸洗和上油	O	酸洗和上油	O
冲压特性	A621	1006 ~1008	经轧制(黑)	A	经轧制(黑)	A
			酸洗-干燥	P	酸洗-干燥	P
			酸洗和上油	O	酸洗和上油	O
冲压特性，特殊镇静	A622	1006 ~1008	经轧制(黑)	A	经轧制(黑)	A
			酸洗-干燥	P	酸洗-干燥	P
			酸洗和上油	O	酸洗和上油	O
热轧带钢						
商业特性	A569	1008 ~1012	经轧制(黑)	A	经轧制(黑)	A
			酸洗-干燥	P	酸洗-干燥	P
			酸洗和上油	O	酸洗和上油	O
冲压特性	A621	1006 ~1008	经轧制(黑)	A	经轧制(黑)	A
			酸洗-干燥	P	酸洗-干燥	P
			酸洗和上油	O	酸洗和上油	O
冲压特性，特殊镇静	A622	1006 ~1008	经轧制(黑)	A	经轧制(黑)	A
			酸洗-干燥	P	酸洗-干燥	P
			酸洗和上油	O	酸洗和上油	O

（续）

特性或回火	适用技术规范编号	SAE-AISI牌号命名	表面质量			
			回火-轧制，用于外露零件①		最后退火，用于不外露零件①	
			描述	符号	描述	符号
冷轧薄钢板						
商业特性	A366	1008～1012	无光	E	无光	U
			商业光亮	B		
			光亮	L		
冲压特性	A619	1006～1008	无光	E	无光	U
			商业光亮	B		
			光亮	L		
冲压特性，特殊镇静	A620	1006～1008	无光	E	无光	U
			商业光亮	B		
			光亮	L		
冷轧带钢						
回火描述 No. 1，2，3，4，5	A109	②	无光	1	无光	1
			常规光亮	2	常规光亮	2
			最光亮	3	最光亮	3

①所列的表面粗糙度的描述可见表2.3-35。 ②按五种回火方式进行生产所指定的硬度和弯曲试验极限值，化学成分由力学性能确定。

表2.3-35 普通碳素钢薄钢板表面状态的选择及其技术规范

规范符号	表面描述	所述表面适用于
U①	表面粗糙度一般，用于不外露的零件。外观无光。通常最后退火	冷轧薄钢板
E②	表面粗糙度一般，用于外露的汽车零件，还要求有好的油漆表面。无变形痕迹，外观无光。硬化冷轧	冷轧薄钢板
B	有商业性光亮外观，其他表面描述同E	冷轧薄钢板
L	有光亮外观，其他表面描述同E	冷轧薄钢板
1	No. 1或暗淡（无光亮）。特别适用于蜡克漆（硝基漆）或喷漆的附着性。减少其金属与模具之间的接触摩擦可应用于拉制	冷轧带钢
2	No. 2或普通光亮的表面粗糙度（中等光滑）。适合许多用途。但一般不用于表面镀层的零件。除非经磨光或抛光	冷轧带钢
3	No. 3或最光亮（比较高的光泽）。特别适合于表面光镀层的零件	冷轧带钢
A	经轧制或黑色的（氧化物或锈皮未曾去除）	热轧薄钢板和带钢
P	经酸洗（锈皮去除），不需上油	热轧薄钢板和带钢
O	经酸洗（锈皮去除），但需上油	热轧薄钢板和带钢

①U，不外露，也就像冷轧钢薄钢板的等级2。 ②E，外露，也就像冷轧钢薄钢板的等级1。

表 2.3-36　冷轧低碳钢带钢的力学性能(ASTMA109)

回　火	硬度要求 HRB	弯曲试验要求①	大约抗拉强度		50mm(2in)长的伸长率②(%)
			MPa	ksi	
No. 1(硬)	90 最低③，84 最低④	各向均无弯曲	550 ~ 690	80 ~ 100	—
No. 2(半硬)	70 ~ 85④	与轧制横向成 90°约 1t 半径的弯曲	380 ~ 520	55 ~ 75	4 ~ 16
No. 3 (1/4 硬)	60 ~ 75⑤	与轧制横向成 180°约 1t 半径的弯曲，和与轧制顺向成 90°，两者均约 1t 半径的弯曲	310 ~ 450	45 ~ 65	13 ~ 27
No. 4(表层轧制)	65 最高⑤	沿其自身任何方向弯曲折平	290 ~ 370	42 ~ 54	24 ~ 40
No. 5 (极软)	55 最高⑤	沿其自身任何方向弯曲折平	260 ~ 340	38 ~ 50	33 ~ 45

①t = 带钢厚度。　②适用于带钢厚度为 1.27mm(0.050in)。　③适用于带钢厚度为 1.02 ~ 1.78mm(0.040 ~ 0.070in)不含。　④适用于带钢厚度为 1.78 ~ 6.35mm(0.070 ~ 0.250in)不含。　⑤适用于带钢厚度为 1.02 ~ 6.35mm(0.040 ~ 0.250in)不含。

碳素钢的特性标注

用于热轧普碳钢的薄钢板和带钢的特性标注，包括结构特性、商业特性、冲压特性和特殊镇静的冲压特性(表 2.3-35)。有些按这些特性生产的轧制材料会受到表面损伤，即所谓的卷裂、弯折和拉伸变形，但是如果材料紧接其成形之前，先进行硬化冷轧和(或)辊子矫平就不会产生弯折和拉伸变形。应当指出的是，对于非镇静钢的任何辊子矫平的作用都会迅速消失。除了在下面所列的有关普通碳素钢的各种特性要求之外，还要规定特殊的致密性要求。

商业特性(CQ)。普通碳素钢的薄钢板和带钢适用于中等程度的成形，拥有这些特性的材料具有足够的塑性，使其在标准室温的弯曲试验中能以任何方向向其自身弯曲折平。商业特性的材料无需其他力学试验的要求，也不要求其有特别一致的化学成分或力学性能。然而，冷轧 CQ 薄钢板的硬度在其供货时一般应低于 60HRB。

冲压特性(DQ)。当提出比商业特性所能提供的塑性和性能均匀性更高的要求时，就得规定冲压特性的要求。冲压特性的材料适合于生产深冲的以及其他一些深度变形要求的零件。当变形特别大或要求具有耐延伸变形的能力时，就需要规定经特别镇静的冲压特性(DQSK)。

结构特性(SQ)。结构特性的正式名称为物理特性(PQ)，除适用于除弯曲试验之外，还用于对强度和伸长率有要求的地方(表 2.3-37)。热轧薄钢板和带钢的抗拉强度范围高达 690MPa(100ksi)，冷轧薄钢板的高达 1035MPa(150ksi)。作为没有特性标注的冷轧带钢可以有五种的回火处理，以此分别与规定的洛氏硬度及弯曲试验要求相对应(表 2.3-36)。

表 2.3-37　结构特性的低合金钢的抗拉强度要求

级别或牌号	最小屈服强度		最小抗拉强度		50mm(2in)长的最小伸长率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi	
结构特性的热轧薄钢板和带钢，截长薄钢板或卷材(ASTM A570)①					
30	205	30	340	49	25.0②
33	230	33	360	52	23.0②
36	250	36	365	53	22.0②
40	275	40	380	55	21.0②
45	310	45	415	60	19.0②

（续）

级别或牌号	最小屈服强度		最小抗拉强度		50mm(2in)长的最小伸长率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi	
结构特性的热轧薄钢板和带钢，截长薄钢板或卷材(ASTM A570)①					
50	345	50	450	65	17.0②
55	380	55	480	70	15.0②
结构特性的冷轧薄钢板和带钢，截长薄钢板或卷材(ASTM A611)①					
A	170	25	290	290	26
B	205	30	310	310	24
C	230	33	330	330	22
D，类1和类2	275	40	360	360	20
E	550③	80③	565	565	—

①生产商对卷材产品的试验仅限于卷材的末端，其试验结果必须与规定值相符；但是作为设计上的考虑，整个卷材的未试验部分的强度会有所变化，但一般不得小于其规定最小值的90%。 ②按厚度 t：2.5～5.9mm(0.097～0.230in)。 ③对于这种最硬的产品，其屈服点接近抗拉强度，因为试验中没有出现仪表示值的停顿或横梁突然下降，所以屈服点以伸长率为0.5%时的应力取值。

力学性能

用普通方法测定的普通碳素钢的薄钢板和带钢拉伸性能并不一定与其加工性能有关，材料的成形性和应变-硬化指数值 n 及塑性应变比 r(在拉伸试验中测出)之间的关系将在本手册(下册)第5篇第4章中予以讨论。具有商业特性、冲压特性以及经特殊镇静的冲压特性的薄钢板和带钢的力学性能通常并不作为技术规范使用，除非在产品的制造过程中有特殊的强度性能要求。然而作为一般性关注，图2.3-2所示是三

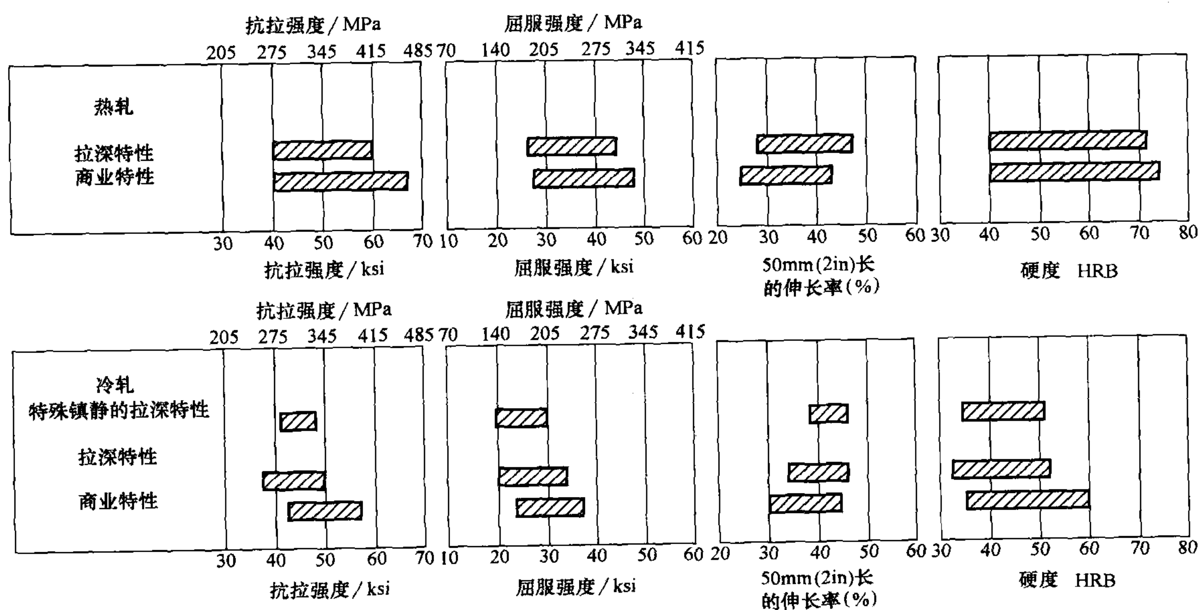


图2.3-2 以特性范围表示的三条轧机所生产的低碳钢薄钢板的一般力学性能。热轧薄钢板的厚度为1.519～3.416mm(0.0598～0.1345in或16～10号厚度)，冷轧薄钢板的厚度为0.759～1.519mm(0.0299～0.0598in或22～16号厚度)，所有的冷轧牌号包括回火处理。所有的牌号都是由沸腾钢轧制而得的，除非另有标明为由特殊镇静而得。结构(物理)特性薄钢板的力学性能见表2.3-37

条轧机生产线按照这些特性生产的普通薄钢板的力学性能范围。如果用于涵盖全部工业产品，则其范围还可更宽。还应指出的是，热轧材料比冷轧材料的性能范围更宽，并且用于热轧的也比用于冷轧的薄钢板更硬一些。

经改进的低碳钢薄钢板和带钢

除了本节已经讨论过的低碳钢薄钢板和带钢产品以外，还有许多别的产品用于满足特定客户的要求。这些用低碳钢生产的产品，其化学成分往往比起前面已经讨论过的略有改进。例如对于 SQ 钢，作为合金元素的锰和磷的加入，是为了通过取代固溶体的强化作用来提高强度：每 w(Mn)为 0.1% 的 Mn 大约提高 3MPa(0.4ksi)，每 w(P)的 0.01% 的 P 大约提高 7MPa(1ksi)。热轧 SQ 钢含有 w(Mn)最高为 0.90%~1.35% 的 Mn 和 w(P)最高为 0.035% 的 P。冷轧 SQ 钢含有 w(Mn)最高为 0.60%~0.90% 的 Mn 和 w(P)最高为 0.035%~0.20% 的 P。SQ 钢中的 w(C)通常为 0.20%~0.25%。

无间隙固溶原子(IF)钢。在被认为具有超深冲特性(EDDQ)的 IF 钢里，通过加入足量的碳/氮-成形元素(一般为钛和/或铌)使碳和氮完全结合，以此消除间隙原子(碳和氮)，用包括真空脱气的炼钢/浇铸现代工艺可以将其降低到 50ppm 以下。

间隙原子含量非常低的钢能表现出高塑性(41%~45%)和低屈服强度(138~165MPa 或 20~24ksi)的极佳成形性，以及很好的深冲性能。通过加入碳氮化物-形成元素，深冲性和无时效性都能得到进一步的改善。

烘烤-硬化(BH)钢。其展示的特点就是由于在适中的温度(125~180℃ 或 260~355℉)的镀层烘烤工序中产生的碳应变-时效作用，从而使其屈服强度得以提高。烘烤硬化对于抗拉强度没有什么影响。人们发现烘烤硬化钢由于其抗碰凹陷而在汽车外车身件(车身、车门及防擦条)上的使用尤显其优势，有时还可以使厚钢板的厚度减薄。

烘烤硬化的性能除了所形成应变的程度和镀层烘烤的条件(温度和时间)之外，还取决于钢的化学成分和工艺过程。具有烘烤硬化特性的钢包括普通低碳钢(连续退火或批量退火)、IF 钢(连续退火)和双相钢(连续退火)。

目前汽车用 BH 钢的技术规范，在其成形(即变形)加上烘烤的条件下，可以按照确定最小屈服强度的幅度或最小烘烤硬化的增量的技术参数进行归类。作为确定烘烤硬化性特征的传统试验，即 2% 拉伸预变形、随后在(175±5)℃[(345±10)℉]温度下烘烤的试验。用其屈服强度的最后增量来衡量材料烘烤硬化性能的大小。

所有的技术规范都要求材料的进货状态(即成形之前)应达到其最小屈服强度，还有一些技术规范则要求了未经任何拉伸预变形的进料在烘烤之后必须达到的最小屈服强度。作为进料的屈服强度为 210~310MPa(30~45ksi)(与 DQSK 的 175MPa 或 25ksi 相比)，而其最终 2% 的预变形加上烘烤之后的屈服强度则为 280~365MPa(40~53ksi)(与 DQSK 的约为 225MPa 或 33ksi 相比)。

合金钢薄钢板和带钢

合金钢薄钢板和带钢主要用于一些通常需通过热处理才能获得力学性能的特殊用途。作为薄钢板和带钢，无论是热轧还是冷轧的标准合金钢都是有相当大的选择余地。最为常用的合金钢如表 2.3-38 所示。除了标准的低合金钢外，高强度低合金钢(HSLA)和双相钢都可成为薄钢板或带钢应用于要求抗拉强度在 290~760MPa 范围里的用途。这些钢将在本章第 9 节里讨论。

表 2.3-38 可用于薄钢板和带钢的标准合金钢

SAE 或 AISI 代号	化学成分范围和极限值(熔炼分析)①(质量分数,%)							
	C	Mn	P	S	Si②	Ni	Cr	Mo
4118	0.18~0.23	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.30	—	0.40~0.60	0.08~0.15
4130	0.28~0.33	0.40~0.60	0.035	0.040	0.15~0.30	—	0.80~1.10	0.15~0.25
4140	0.38~0.43	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.30	—	0.80~1.10	0.15~0.25
4340	0.38~0.43	0.60~0.80	0.035	0.040	0.15~0.30	1.65~2.00	0.70~0.90	0.20~0.30
5140	0.38~0.43	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.30	—	0.70~0.90	—
5150	0.48~0.53	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.30	—	0.70~0.90	—
5160	0.55~0.65	0.75~1.00	0.035	0.040	0.15~0.30	—	0.70~0.90	—
8615	0.13~0.18	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.30	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25
8620	0.18~0.23	0.70~0.90	0.035	0.040	0.15~0.30	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25

①表中所示的化学成分的范围和极限值符合成品分析公差。见 ASTM A505。 ②其他硅的范围也适用。与生产商协商。

特性标记

如同钢轧制品已经使用的“特性”一词，其意思是指轧制品被应用于制造某一类零件所具有的一般适用性。对于合金钢薄钢板和带钢，用不同的特性标记表示其特定的内在特征，如内部质量以及表面有害缺陷的相对规避。

用于合金钢厚钢板和薄钢板的特性标记包括常规特性、冲压特性和航空用特性，ASTM 技术规范对这些均有规定。有关这些特性的一般性要求都可从 ASTM A505 中找到。其他还有轴承特性和航空结构特性。AMS 技术规范里还包含了航空特性的要求。

轧制热处理

具有常规特性的热轧合金钢薄钢板和带钢通常都是由作为轧制或热处理的生产商提供的。标准的轧制热处理条件有：退火、正火和正火加回火。冷轧常规特性产品通常只能以退火条件供应。

预涂层薄钢板

薄钢板常在被加工之前由轧钢厂或被称为卷材镀层厂的专业厂以卷材的形式进行镀覆。

镀层工艺的基本类型包括金属镀、转换镀、底层预涂和精整预涂。金属镀层可用锌、铝、锡、铅锡合金或由铝与锌联合使用。转换镀层就是全部用磷的镀层。底层预涂的成品是用铬酸锌和富锌镀层制成的。精整预涂是轧钢厂或卷材镀层厂利用卷材镀层生产线将有机漆涂敷于薄钢板上。

锌镀层

利用下列三种工艺中的一种将金属锌镀于铁或钢的表面上：热浸镀锌、锌电镀或锌喷镀。大部分的镀锌薄钢板都是采用热浸工艺。

镀层的厚度是决定镀层产品性能的关键因素。一般来说，镀层越厚、抗腐蚀性也越强，而镀层越薄会使产品的成形性和焊接性也越好。镀层的量可以用单位面积上的质量来表示。这可以通过先对镀层产品的一个截段部分称重，然后在酸溶液中剥离镀层，最后再次称重的方法进行测定。表 2.3-39 所示就是 ASTM 要求的镀层厚度及其质量。镀层厚度通常用镀于单面的镀层表示，而测出的质量是其两面镀层的和。

表 2.3-39　连续热浸薄钢板的名义镀层质量和厚度

镀层型号①	代号	镀层质量②/(g/m²)	镀层厚度③/μm	镀层型号①	代号	镀层质量②/(g/m²)	镀层厚度③/μm
锌(A525)	Z1100	1100	78	铝(A463)	T2 100	305	48
	900	900	64	型号2	65	195	30
	700	700	50		LC	④	④
	600	600	42	Zn-5Al(A575)	ZGF 700	700	48
	450	450	32		600	600	41
	350	350	25		450	450	31
	275	275	19		350	350	24
	180	180	13		275	275	19
	90	90	6		225	225	15
	001	④	④		180	180	12
锌-铁(A525)	ZF180	180	11		135	135	9
	120	120	9		90	90	6
	100	100	7		001	④	④
	75	75	5	Zn-55Al(A792)	AZ 180	180	24
	001	④	④		165	165	22
铝(A463)	T1 40	120	20		150	150	20
型号1	25	75	12	铅-锡(A308)	LT110	336	15

（续）

镀层型号①	代号	镀层质量②/(g/m²)	镀层厚度③/μm	镀层型号①	代号	镀层质量②/(g/m²)	镀层厚度③/μm
铅-锡(A308)	85	259	12	铅-锡(A308)	35	107	5
	55	168	8		25	76	3
	40	122	6		01	④	④

注：所有数据均按规定的三点最小值取。

①ASTM 技术参数均出自 ASTM 的《ASTM 标准的年书》01.06 卷：镀层钢产品。 ②两面。 ③单面。以 g/m^3 为单位：锌和锌-铁，7.07；铝型号1，3.017；铝型号2，3.21；Zn-5Al，6.87；Zn-55Al，3.70；铅-锡，11.08。 ④无最小值。

热浸镀锌。这是一种通过把铁和钢的表面浸入锌的熔浴里，而在其上面形成锌和铁-锌合金的附着、保护镀层的工艺。大部分的薄钢板镀锌层都利用这种工艺在连续的镀锌生产线上完成的。

典型的热浸镀锌镀层，是由一系列的层次所组成的。从镀层底面的钢基面开始其层次的锌含量逐层增加，直到最外层次的相对纯锌。因此在铁和锌之间并不存在一条明显的分界线，而正是这一系列成分逐渐转化的铁-锌合金在基体金属与其镀层之间提供了很强的连接键。

锌电镀。利用锌电镀能在钢产品表面形成非常薄的锌镀层，将其用于深度冲压和喷漆是非常理想的。锌通过电沉积涂敷于各种轧制品、薄钢板、线材，有时还有管材上。卷材形式的锌电镀薄钢板和线材具有薄且均匀的纯锌镀层。

锌电沉积镀层在结构上比热浸镀锌镀层更为简单。它们是由纯锌组成的，有着均匀的结构和很高的附着性。其镀层一般不像热浸镀锌镀层那么厚，然而它确实有很好的耐腐蚀性。镀层单面的厚度/质量介于4～14μm(30～100g/m²)之间，虽然最普通的镀层厚度/质量为8和10μm(60和70g/m²)。对于非汽车用钢其厚度/质量可以用到低至1.5μm(10g/m²)。电沉积锌的附着性可以与任何一种其他的金属镀层相媲美。因为其极佳的附着性，锌电镀的薄钢板及钢丝的卷材有很好的压力加工性能，纵然深度变形仍能保持致密。良好的附着性取决于镀层与基体金属之间亲密的物理相容性，故开始时的清洗必须特别仔细。对于无法采用浸渍的成品零件，电沉积也成为其一种锌镀层的方法。它对于进行因高温工艺处理而损伤零件的情况来说特别有用。锌电镀的另一个优点就是能在冷态下进行，从而不会改变钢的力学性能。

锌喷涂。它是将熔化锌的雾化颗粒喷涂在经过处理的金属表面上。目前有三种生产上用的喷枪：熔化金属的喷枪、粉末喷枪和金属丝喷枪。喷涂成的镀层略微有些粗糙和疏松，普通镀层的比重大约为6.35，而与之相比，铸锌的比重为7.1。这种轻微的疏松度并不会影响镀层的保护性，因为锌相对于钢为阳极。在使用过程中所形成的锌腐蚀产物会填满镀层的孔隙，并呈现出固体的外观。表面的轻微粗糙度经适当的预处理后作为喷漆的基体确是很理想的。

铬酸盐钝化。可以有多种表面处理方法用于镀锌表面以获取较高的耐腐蚀性。其中用于新镀锌表面的最简单的方法就是铬酸盐钝化处理，它可同样地适用于热浸镀锌、锌喷涂以及其他镀锌的零件。通常其处理包括将零件清洗干净，然后把它浸入温度约为20～30℃(68～86℉)的铬酸或重铬酸钾的溶液里，随后用冷的清水漂洗，并在暖风中吹干。

阳极化处理。钢的镀锌表面经阳极化处理所形成的表面具有特别耐腐蚀、磨损、热和擦伤的能力。阳极化薄膜是一种电的绝缘体。其薄膜是通过将加工完毕的零件浸入普通电解液里，然后通上逐步增加的电压长达10min而形成的。如果与铬酸盐转化镀层相比，这种阳极化锌的非反射功能的镀层更能显示其突出的性质。厚度在25～33μm(1.0～1.3mil)的阳极化锌镀层即使当其温度高达锌的熔化温度，也不至于发生损伤。

油漆。选择镀锌钢材作为车库、建筑物、屋顶、板壁、器具和各种硬件的材料使用，是要基于牺牲由锌镀层赋予基体金属的保护及由其形成的隔离镀层方面的考虑。不过，为了增加保护和美化外观，常常要给镀锌钢材涂上油漆。

焊接性。镀锌钢材一般都推荐用直接点焊，其钢材可以为热浸镀锌或锌电镀的，因为当要焊接镀锌钢材而需要加上超大电流时，由于一系列的焊接所引起的短路电流会造成电极的过热并缩短电极的寿命。

锌电镀薄钢板的焊接性随其镀层厚度在0.005～0.025mm(0.0002～0.001in)范围里的增加而降低。然而，当薄钢板的厚度增加到1.5mm(0.060in)以上时，焊接性的提高与镀层厚度无关。热浸镀锌厚钢板

的焊接性能受锌-铁合金层的厚度、均匀性以及非合金化锌的厚度所影响。

铝镀层

镀铝的薄钢板(用铝镀层)应用于需要耐热、能热反射或耐腐蚀的既美观又经济的薄钢板的情况下。镀铝是在类似于热浸镀锌厚钢板的连续生产线上进行生产的。冷轧薄钢板热浸于铝或 $w(Si)$ 为 5%~11% 的铝合金的金属熔化液体里。镀层由两层分界层组成。在铝-硅合金的外层和钢的基体金属之间形成一层铝-铁-硅的合金层。这种合金会显著影响表面的塑性、附着性、均匀性、平滑性及其外观，并且通过对它的控制获得最佳性能。

镀层厚度。会生成两种铝镀层(表 2.3-39)。型号 2 是通过浸在非合金的铝浴里而生成的一种较厚(一般为 30~50μm)的镀层。这种产品应用于户外的结构用途，如屋顶、涵洞和粮仓，只需不高的成形要求。

型号 1 铝镀层是一种较薄的铝-硅合金镀层，主要用于要求成形性、耐高温的用途里，如汽车排气管部件。型号 1 铝镀层还能用于改善外观。对于其大部分的用途，型号 1 镀层(级别 40)的常用厚度约为 20~25μm(0.8~1mil)。当特别要求最大成形性时，则规定更薄的镀层厚度为 12μm(级别 25)。

耐腐蚀性。铝作为薄钢板保护层的价值主要在于其固有的耐腐蚀性。在大部分的环境中铝的长期腐蚀率只有锌的 15%~25%。一般来说，一种铝镀层对于钢保护价值取决于其厚度。只要镀层能维持不受损伤，就能提供长期的保护。

铝镀层在大部分的环境中特别当裸露在大气中无须提供牺牲阳极的保护。

耐热性。镀铝的薄钢板有优异的抗高温氧化性。在表面温度超过约 510℃(950℉)时，铝镀层能保护钢的基体不受氧化，且其自身也不会发生色变。在 510~675℃(950~1250℉)的温度下，镀层能为钢提供保护，但是铝-铁-硅合金的形成会造成一些发暗。该合金极为耐热但不能长期暴露其间，由于它与钢有着不同的膨胀系数，故当超过 675℃(1250℉)时，镀层就会变脆并发生剥落。

焊接性。镀铝薄钢板能用电阻焊(点焊或缝焊)进行连接，也可进行金属电弧焊、火花对接焊或乙炔氧焊。在连接前，建议用钢丝刷将油、脂、漆和脏物彻底清除。金属电弧焊和乙炔氧焊还要求使用专门的熔剂。在点焊过程中电极上有可能粘上铝，因此点焊的极头必须比点焊不镀层的厚钢板要更频繁地进行修磨。还有，其电流密度也应更大一些。

锡镀层

可以通过电解沉积或沉浸于锡的熔浴里(热浸工艺)的方法给薄钢板表面镀锡。热浸锡镀用于食物用具、包装和乳制品设备，为其提供无毒的保护性和装饰性镀层，并适用于电子、电器元件的软钎焊。在美国，热浸锡镀已经为电解锡镀所替代。

电解锡镀薄钢板用于在某些条件下锡焊的可焊性、外观或耐腐性都很重要的用途，如电子设备、食物器具及加工设备和实验室支架。它一般都是通过在一种有钝化表面纹理的、并称为“黑钢板”的金属薄钢板的基体上生成一种未经熔化的镀层，从而形成一种无光的镀层表面。它也可以在有光滑表面纹理的金属薄钢板的基体上进行镀层，然后使其镀层熔化，最后形成一种光亮的镀层表面。电解锡镀薄钢板的名义厚度通常为 0.38~0.84mm(0.0115~0.033in)，而宽度为 300~910mm(12~36in)。

其镀层的厚度范围在 0.4~1.5μm，尽管通常是用镀层的质量表示，但目前单面的镀锡质量为 0.5~11g/m²。在美国，镀锡层按照锡的总重量编号(表 2.3-40)(即每一标准箱的薄钢板双面所镀的锡的重量，每箱规定有 112 张 14×20in 大小的薄钢板)。目前出于经济和技术方面的原因有用低锡镀层的趋势，最普通的为 No.20 或 25(2.2 或 2.8g/m²)。

表 2.3-40　电解锡镀层重量和质量代号

代号编号	单面镀锡层的名义重量①	单面最小平均镀锡层的重量①②	代号编号	单面镀锡层的名义重量①	单面最小平均镀锡层的重量①②
	(lb/标准箱)			(lb/标准箱)	
镀层重量按照 ASTM A624			镀层重量按照 ASTM A624		
10	0.05/0.05	0.04/0.04	50	0.25/0.25	0.23/0.23
20	0.10/0.10	0.08/0.08	75	0.375/0.375	0.35/0.35
25	0.125/0.125	0.11/0.11	100	0.50/0.50	0.45/0.45
35	0.175/0.175	0.16/0.16	D50/25③	0.25/0.125	0.23/0.11

（续）

代号编号	单面镀锡层的名义重量①	单面最小平均镀锡层的重量①②
	（lb/标准箱）	
镀层重量按照 ASTM A624		
D75/25③	0.375/0.125	0.35/0.11
D100/25③	0.50/0.125	0.45/0.11
D100/50③	0.50/0.25	0.45/0.23
D135/25③	0.675/0.125	0.62/0.11

名义每面镀锡层的质量	每面最小平均镀锡层的质量试验值④/(g/m²)
镀层质量按照 ASTM A624	
1.1/1.1	0.9/0.9
2.2/2.2	1.8/1.8
2.8/2.8	2.5/2.5
3.9/3.9	3.6/3.6
5.6/5.6	5.2/5.2
8.4/8.4	7.8/7.8
11.2/11.2	10.1/10.1
D5.6/2.8③	5.2/2.5
D8.4/2.8③	7.8/2.5
D11.2/2.8③	10.1/2.5
D11.2/5.6③	10.1/5.2
D15.2/2.8③	14.0/2.5

注：以上所列为普通生产的镀层重量和质量。根据买卖双方的协商可以规定其他镀层的组合，并遵循适当的最小平均试验数值。

①标准箱是作为一种表面积的度量，它等于31360in²。②最小值不应小于最小平均镀层重量的80%。　③有着不同镀锡层的厚钢板，字母D表示需要作标记的镀层表面。　④最小点处的值不应小于最小平均镀锡层质量的80%。

铅锡镀层

长镀铅锡薄钢板是碳素薄钢板利用不同的铅锡合金(铅加上3%~15%的锡)热浸工艺连续镀敷而成的。这种镀层薄钢板的外观比一般的镀锡薄钢板的更为灰暗，因此其英文名称(terne)来自法文，意思是“灰暗”或“使之失去光泽”的。平滑、灰暗的镀层可以提高薄钢板的耐腐蚀、成形性、极佳的软钎焊(即锡焊)性以及油漆性。“长铅锡镀”指的是镀铅锡薄钢板，而“短铅锡镀”则指的是镀铅锡厚钢板。

由于其不寻常的性能，长镀铅锡薄钢板有着非常广泛的应用。其最大的用途为汽车的汽油箱。这是因为它有极佳的软钎焊性和耐腐蚀性。

长镀铅锡薄钢板常按照 ASTM A308 生产，其镀层是按表2.3-39所示的双面镀层总重量命名的。对于要求有好成形性的用途，可将镀层用于商业特性、冲压特性或特殊镇静冲压钢的低碳薄钢板，铅锡镀层能起到润滑剂的作用，故有助于成形，而且铅锡金属的强劲结合键使其能随基体金属一起成形。当要求有更高的强度时，镀层可以用于结构(物理)特性的低碳薄钢板，尽管此时其塑性有所损失。

磷化镀层

铁和钢的磷化处理就是使用稀磷酸溶液和其他化学物质的处理，从而金属表面通过与磷酸的化学反应形成一层完整的由难以溶解的结晶状磷化物组成的覆盖层。该覆盖层比金属表面更不活泼，同时也更能粘附润滑剂和油漆。因为镀层是表面的一个完整部分，所以能牢牢地粘附在基体金属上。

铁磷化镀层主要作为非镀锌碳素薄钢板的油漆基体使用，这种镀层处理通常是在卷材-镀层线上进行的。磷酸锰镀层主要作为润滑剂应用于发动机零件的磨合，并防止发生擦伤。

搪瓷用薄钢板

搪瓷是一种主要应用在以薄钢板、铸铁或铝制成的产品或零件上的玻璃状涂层，以提高外观和保护金属表面。在金属基材上，搪瓷与其他陶瓷涂层的不同之处在于其突出的玻璃性质和各种特有的用途。这种涂层与油漆的差别在于无机的化学成分及涂层性质。它们在熔烧过程中超过425℃(800℉)时会熔敷于金属基材上。

在选定用于搪瓷的薄钢板之前应当对其性能进行检定，一些薄钢板之所以不适用是由于其存在使在薄钢板上进行涂层的搪瓷工艺复杂化的问题，主要表现在以下四个方面：

- 在搪瓷熔烧过程中，达到所需温度时会发生弯曲和翘曲，由此引起工件的变形。
- 表面的处理不到位会造成粘附不良。
- 特别由于氢气逸出而造成不同程度的延迟，

并因此出现鱼鳞斑的瑕疵。

- 由钢的表面碳化物造成搪瓷涂层中碳的气泡化。

现在已经生产出用于单面搪瓷(白色或有颜色)的钢材。这些钢材除了能单面涂敷外，还有很好的抗弯曲性，并能避免碳气泡的产生、鱼鳞斑的形成、与碳有关的其他问题以及内部缺陷。这种钢有很高的成形性，可以拉制成比搪瓷铁更复杂的形状。

薄钢板的种类

有六种薄钢板可用于搪瓷，下面逐一介绍。在大部分情况下，按牌号订货或开始投料生产之前，应该向供货商作详细的查询。表 2.3-41 所示是搪瓷用钢一般所推荐采用的化学分析。

表 2.3-41　用于搪瓷的低碳钢化学成分

钢的种类	化学成分①(质量分数,%)								
	C	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	B	Si
低碳搪瓷钢②	0.02 ~ 0.04	0.15 ~ 0.3	0.015③	0.015③	0.03 ~ 0.07	—	—	0.006	0.015③
脱碳钢	0.005	0.2 ~ 0.3	0.01	0.02	④	—	—	—	—
钛稳定钢	0.05	0.30	0.01	0.02	0.05	0.30	—	—	—
无间隙原子钢	0.005 ~ 0.02	0.20	0.01	0.02	—	0.06 ~ 0.15	0.10	—	—
冷轧钢	0.06	0.35	0.01	0.02	④	—	—	—	—

①所有成分中的余量为铁。　②代替搪瓷铁的铝镇静钢，这是一种沸腾钢锭浇铸产品，以前一直用于搪瓷。　③最大值。　④其中一些可作为铝镇静钢产品供货。

低碳搪瓷钢(代替搪瓷铁)。很多年以来，专门应用于搪瓷的搪瓷铁都采用沸腾钢锭浇铸和低准金属含量的产品。性能上乘的搪瓷都要说明产品在面涂以前要求单独进行底涂。因为搪瓷铁是沸腾钢，故无法连续浇铸，由于目前钢铁工业已演变为连续浇铸，故其产品也已退出市场。

现在已经有许多很实用的搪瓷铁的替代产品可以用于搪瓷。一些铝镇静钢有着低含碳量(w(C)为0.02%~0.04%)和低含锰量(w(Mn)为0.15%~0.30%)，再加上w(P)最高为0.015%的P、w(S)最高为0.015%的S、w(Si)最高为0.015%的Si以及w(Al)最高为0.03%~0.07%的Al。有些再加入硼(w(B)最高为0.006%)将有助于其晶粒大小的控制，并防止鱼鳞斑的生成。其屈服强度为172~221MPa(25~32ksi)，抗拉强度为303~338MPa(44~49ksi)，而伸长率则为38%~46%。

这些产品不像老的搪瓷铁那样需要进行正火，它们用箱式退火或者连续退火就可以了。这样的工艺改变使钢材比其老一代产品更容易成形。如今的经验表明，它们的搪瓷特性与搪瓷铁的很相似，而且也用于相同的用途。它们对于底涂和双涂敷/双烧熔的两种系统都能很好地适用。

脱碳钢。随着开卷退火工艺的开发，用于直接搪瓷涂敷的全脱碳薄钢板的制造变得很实用。不同的熔化和浇铸工艺可用于生产脱碳薄钢板：例如钢包铝镇静钢锭浇铸和钢包铝镇静钢连续浇铸。这些铝镇静产品在硬化冷轧之后不必进行屈服点延伸的恢复。作为镇静钢，热带钢的热开卷机可以消除被进行深拉的可能性，但是在延展和平面变形的条件下，脱碳钢有非常优良的性能。

脱碳钢有非常好的搪瓷特性，这种钢目前已在各种搪瓷加工系统中得到应用。低含碳量能消除大部分的气泡化及由其形成的缺陷，如在烧熔的过程中由于二氧化碳、一氧化碳从搪瓷涂层里逸出而形成的黑斑、穿透和凹坑。

这些钢具有非常好的抗翘曲能力。在涂敷的熔烧过程中，它们还显示了较强的防止如鱼鳞斑、底涂再度气泡化等缺陷产生的能力，上述两种缺陷都是因为氢气的逸出而造成的。如果利用酸蚀/镍沉积金属的处理方法，钢包镇静钢将可能形成有气孔的搪瓷表面，而且搪瓷的附着力也许达不到标准的规定。钢包铝镇静和连续浇铸法正在成为这种钢的主要生产方式。可以预期，不久所有的脱碳钢都将用这种方法制造。

无间隙原子钢。这是一种其里面所含的碳和氮都与一种合金元素相结合的产品。通过添加钛或铌(即钶)，或两者的结合物可以使钢得到充分的稳定。国产的IF(无间隙原子钢)钢含有(质量分数)<0.008%~0.020% C、0.15%~0.25% Mn、0.06%~0.15% Ti 和

0～0.10% Nb。真空脱气用于生产含碳量极低的钢种，故含碳量较高的钢种要用碱性氧吹炉进行控制。

这种高成形性的钢在变形和熔烧后仍能保持极佳的强度，以及优良的基体金属的弯曲性能。它们确实不会出现拉伸应变，而且既无时效也无表面发裂。由于钛会影响底涂附着力的形成，所以搪瓷系统应进行优化以确保底涂与这种钢之间的附着力。

业已证明，这种钢对于器具和水管附件方面的许多特定用途是十分有价值的，尤其是需要深度拉深的用途。还有，其产品可以用钢锭浇铸或连续浇铸生产，并因此能保证其未来的使用价值。

钛稳定化钢。它是 IF 钢的一种变型。这种钢普遍应用于大型面板上，因为其具有的抗翘曲性能最大限度地保持产品的平整度。由于没有经过真空脱气，故这种钢的含碳量要高于 IF 钢。

钛加入后，其中碳因成为碳化钛而得到稳定。这种稳定性既能防止碳发生气泡化又具有熔烧后的高强度，以及优异的深度拉深性。较高的碳化钛含量能提高屈服强度和降低整体的塑性。这种钢既能提供高温强度又能形成抗翘曲能力，现在是作为连续浇铸的产品而生产的。

普通冷轧薄钢板。它们在搪瓷业中应用了许多年，一直是作为典型的沸腾钢锭浇铸钢，但现在作为连续浇铸产品进行生产。它们一般含有（质量分数）0.04%～0.07% C、0.25%～0.040% Mn（原文如此——译者注）。对于冷轧的冲压特性钢，屈服强度为 193～220MPa（28～48ksi），伸长率为 40%～44%。冷轧薄钢板搪瓷的应用仅限于底涂和无特别外观的零件。

冷轧薄钢板也可以用于双涂层搪瓷，这时其外观与高档零件或其他大多数仪器的外部零件相比并不是很重要。因为冷轧薄钢板在搪瓷过程中发生翘曲和碳气泡化的可能性都比较大，所以这种材料的应用一般限于：在熔烧的过程中可能产生的翘曲能够控制在公差范围之内的零件，使用低搪瓷熔烧温度的用途，或者可以增加金属厚度的零件，以此将其翘曲降低至最低限度。大部分的专业人士建议冷轧薄钢板制造的零件用单面搪瓷，这仅仅是为了尽量减少鱼鳞斑的缺陷。

普通热轧薄钢板。使用热轧薄钢板进行搪瓷对于鱼鳞斑有较高的敏感度，特别是要进行两面搪瓷。对于某些用途如热水容器，因厚度/强度的要求必须使用热轧薄钢板时，应该限制薄钢板只能用单面搪瓷。以此让会产生鱼鳞斑的氢气能从非搪瓷的一面逸出。

碳素钢厚钢板和低合金钢厚钢板

厚钢板是指所有平轧的宽度超过 200mm（8in）和厚度超过 6mm（0.23in），或者宽度超过 1220mm（48in）和厚度超过 4.6mm（0.180in）的钢材产品。用于轧制厚钢板的主要轧钢机工作宽度为 2030～5600mm（80～220in）。因此，产品的正常适用宽度范围为 1520～5080mm（60～200in）。北美市场上的大部分厚钢板宽度都为 2030～3050mm（80～120in），其厚度范围为 5～200mm（3/16～8in）。然而，有些轧机具有轧制 640mm（25in）以上厚钢板的能力。

厚钢板通常适用于热精轧的工况，但是通过控制最终轧制温度可以改善其强度和韧性。热处理也能用于改进一些厚钢板的力学性能。

基本要求

厚钢板主要用于建筑、桥梁、轮船、机车车厢、仓库、压力容器、管道、大型机器以及其他重型结构的构建，为此要求有良好的成形性、焊接性和加工性。这些所要求的性能随含碳量的增加而变差，故这类厚钢板仅限于低碳或中碳的结构钢，并以低碳钢牌号为主。许多的合金钢也用于生产厚钢板，然而作为最后的结构，有时结构钢厚钢板经过热处理能获得比一般热精轧产品更为优越的力学性能。

炼钢工艺

从尽量减少化学成分的偏析和力学性能的均匀一致的观点来看，镇静钢经过充分的脱氧，可应用于较高质量要求的用途。因此，当要求厚钢板有均匀的组织和完美的内部质量时，一般规定要使用镇静钢。

真空脱气。这常用于去除钢内的溶解氧和氢，以此减少其内部所含有的非金属夹杂物的数量和大小。它还能减少因氢超过允许的含量时所产生的内部裂缝或“剥落”之类的缺陷。

脱硫。通过熔融金属脱硫或浇铸前即刻钢包脱硫，厚钢板的最终含硫量（质量分数）可降低到 0.005% 以下。较低的含硫量可提高厚钢板的塑性和冲击性能，但是厚钢板的成本会因此提高。

电渣重熔。是一种电极自耗的重熔工艺，用于生产最高质量的厚钢板，尤其是很厚的钢板。首先将一块钢锭用常规的方法熔化，使其凝固成电极的形状以供重熔用。然后利用强电流通过活性熔剂使其重熔并再凝固。所得到钢锭的硫、氧含量都非常低，而且没有气孔和偏析。

特性标记

指称厚钢板的钢材特性用于表示许多条件，如内在质量达到的程度、力学性能和化学成分的相对一致

性以及有害表面缺陷的相对清除情况。表2.3-42示出了不同种类的厚钢板特性。

表2.3-42 碳素钢、HSLA和低合金钢的厚钢板的现行特性等级

碳素钢厚钢板	HSLA厚钢板	低合金钢厚钢板
常规特性	—	—
结构特性	结构特性	结构特性
冲压特性	冲压特性	冲压特性
冷拉特性	冷拉特性	冷拉特性
冷冲特性	—	—
折边特性	折边特性	折边特性
锻造特性	锻造特性	—
压力容器特性	压力容器特性	压力容器特性
—	—	飞机特性

常规特性的碳素钢是按$w(C)$最高为0.33%的含碳量生产的。不能指望这种特性的厚钢板在化学成分一致性、内在质量的致密性以及表面缺陷的清除方面能与结构特性或压力容器特性的厚钢板相当。

结构特性和压力容器特性厚钢板的生产要满足有关的标准技术规范，而这些规范是由属若干技术规范编制机构中的一个所制定的。ASTM A6包含了在各个ASTM技术规范中所描述的结构特性厚钢板产品的一般性要求。而ASTM A20则涵盖了压力容器特性产品的一般性要求。

钢的种类

三大类一般的厚钢板即为碳素钢、合金钢和高强度低合金钢(HSLA)。这三大类的厚钢板反映在表2.3-42所列的厚钢板特性级别上。表2.3-43列出了用于结构特性厚钢板的不同ASTM技术规范。以标准代号(SAE-AISI)和ASTM代号标注碳素钢和合金钢的化学成分，可参阅本章第1节。HSLA钢的成分、性能和应用在本章第9节中阐述。高温条件下应用的厚钢板，如铬钼合金钢可参阅本章第13节的有关内容。还有一些厚钢板是按照更高合金等级的特种牌号进行生产的，例如断裂韧性钢和马氏体时效钢。这些内容都将在本章第10节中讨论。

表2.3-43 结构特性厚钢板的ASTM技术规范

ASTM技术规范①	钢的种类和状态
碳素钢	
A36②	结构特性的碳素钢型材、厚钢板和棒材
A131③	用于造船的结构钢型材、厚钢板、棒材和铆钉(普通强度)
A283②	低和中等抗拉强度的碳素钢厚钢板
A284	用于机器零件和一般建设的低和中等抗拉强度的碳-硅钢厚钢板
A529④	具有屈服点最小为290MPa(42ksi)结构钢
A573	结构特性的经韧性改良的碳-锰-硅钢厚钢板
A678	用于结构用途的调质碳素钢和HSLA钢厚钢板
A709	碳素钢和HSLA钢的结构型材、厚钢板和棒材，用于桥梁的调质合金钢
A827⑤	用于锻造的碳素钢厚钢板
A830⑤	按化学成分要求提供的结构特性碳素钢厚钢板
合金钢	
A514	用于焊接桥梁和其他结构用途的结构特性调质合金钢厚钢板
A709	用于焊接桥梁和其他结构用途的结构特性调质碳素钢厚钢板
A710	用于一般性用途的低碳时效硬化的Ni-Cu-Cr-Mo-Nb、Ni-Cu-Nb和Ni-Cu-Mn-Mo-Nb合金钢厚钢板、型材和棒材
A829⑤⑥	规定化学成分的结构特性合金钢厚钢板
HSLA钢	
A131③	用于造船的结构钢型材、厚钢板、棒材和铆钉(高强度)
A242	用于焊接、铆接和螺栓连接结构的HSLA结构钢型材、厚钢板、棒材
A441⑦	Mn-VHSLA钢的厚钢板、棒材和型材
A572	作为应用于桥梁、建筑及其他结构上的铆钉、螺钉或焊接构件用的HSLA的Nb-V结构钢厚钢板、型材和打板桩

（续）

ASTM 技术规范①	钢的种类和状态
HSLA 钢	
A588⑧	作为应用于耐大气腐蚀的能力大约两倍于含铜碳素钢的桥梁、建筑上的铆钉、螺钉或焊接构件用的 HSLA 结构钢型材、厚钢板和棒材
A633	应用于 -45℃（-50℉）或以上的低环境温度的焊接、铆钉和螺钉构件的正火 HSLA 结构钢
A656	应用于卡车车身、悬臂撑架、起重机吊臂、铁路机车及类似用途的经成形性改良的热轧 HSLA 结构钢
A678	应用于卡车车身、悬臂撑架、起重机吊臂、铁路机车及类似用途的经成形性改良的热轧碳素结构钢
A709	应用于卡车车身、悬臂撑架、起重机吊臂、铁路机车及类似用途的经成形性改良的热轧碳素结构钢
A808	经缺口韧性改良的热轧 HSLA Mn-V-Nb 结构钢厚钢板
A852	作为应用于耐大气腐蚀的能力大约两倍于含铜碳素钢的桥梁、建筑上的铆钉、螺钉或焊接构件用的调质 HSLA 结构钢厚钢板
A871	具有耐大气腐蚀的能力大约两倍于含铜碳素钢的轧制、正火或调质状态的 HSLA 结构钢厚钢板

注：由 ASTM A6 规定的结构厚钢板的一般性要求。

①当技术规范中包括米制等效值时，词尾用“M”标记之。　②该规范也由美国机械工程师学会颁布，它用词头“S”（如 SA36）标记之。　③也见美国航运局（American Bureau of Shipping）技术规范 43 章和 MIL 22698（SH）。　④最大厚度 13mm（1/2in）。　⑤也见《AISI 钢材产品手册》。　⑥如适应的话，拉伸性能也可以有规定。　⑦1989 年中断，并由 A 572 代替。　⑧最小屈服点 345MPa（50ksi）对应在 100mm（4in）处。较厚的截面处，其最小屈服点随之降低。

力学性能

在为厚钢板所一般制定的各种力学性能中，屈服强度是结构应用中的一个重要设计参数值。在美国的许多设计法规里，抗拉强度也是一个重要的设计依据，但是它的用途主要是作为疲劳性能予以考虑。当屈服强度与强度极限的比值小于 0.5 时，屈服强度在大部分的设计规则中都是一个重要的设计参数。以伸长率和断面收缩率为度量的塑性，本身很少被当作有价值的设计参数，但是有时也作为韧性的标志和特定用途的适用性。

在热精轧的条件下，厚钢板的力学性能是受若干变量的影响的，其中化学成分的影响是最大的。其他因素包括脱氧工艺、精轧温度、厚钢板厚度和所含有的残留元素。作为在热轧条件下使用的钢材（如厚钢板），含碳量是决定力学性能的最重要的单一因素。应当指出的是，表 2.3-44 中所列的在 ASTM 技术规范中所包括的部分不同牌号、型号和等级厚钢板的静态抗拉强度值，随厚钢板的厚度/宽度的改变而变化。

表 2.3-44　碳素钢和合金钢厚钢板的 ASTM 力学性能

ASTM 技术规范	材料的牌号或型号	抗拉强度①		屈服强度①		200mm（8in）长的最小伸长率②（%）	50mm（2in）长的最小伸长率②（%）
		MPa	ksi	MPa	ksi		
碳素钢							
A36	—	400～500	58～80	220～250②	32～36②	20	23
A131	A，B，D，E，CS，DS	400～490	58～71	220②	32②	21②	24
A283	A	310～415	45～60	165	24	27	30
	B	345～405	50～65	185	27	25	28
	C	380～485	55～70	205	30	22	25
	D	415～515②	60～75②	230	33	20	23

（续）

ASTM技术规范	材料的牌号或型号	抗拉强度①		屈服强度①		200mm(8in)长的最小伸长率②(%)	50mm(2in)长的最小伸长率②(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi		
碳素钢							
A284	C	415	60	205	30	21	25
	D	415	60	230	33	21	24
A529	—	415～585	60～85	290	42	19	—
A573	58	400～490	58～71	220	32	21	—
	65	450～530	65～77	240	35	20	—
	70	485～620	70～90	290	42	18	—
A678	A	485～620	70～90	345	50	—	22
	B	550～690	80～100	415	60	—	22
	C	585～793②	85～115②	450②	65②	—	19
A709	36	400～550	58～80	250	36	20	23
合金钢							
A514	所有	690～895②	100～130②	620②	90②	—	16
A709	100，100W	700～915	100～130	635②	90②	—	15
A710	A(1级)	585②	85②	515②	75②	—	20
	A(2级)	485②	70②	415②	60②	—	20
	A(3级)	485②	70②	415②	60②	—	20
	B	6.05②	88②	515②	75②	—	18
	C(1级)	690	100	620	90	—	20
	C(3级)	620②	900②	550②	80②	—	20

①所列单一数值者为最小值。　②最小和/或最大值取决于厚钢板的宽度和/或厚度。

第4节　钢的棒材、圆钢和线材

热轧钢棒材和型材

热轧钢的棒材和其他热轧钢的型材都是用钢锭、初轧坯，或由钢锭加工成的方坯，以及由单流连铸的初轧坯和方坯生产得到的，并且形成不同的尺寸和横截面。这些棒材和型材最常见的是按直形的长度进行生产，但有些尺寸和截面的棒材生产成为卷材。

“棒材”一词包括圆形、方形、六角形及类似的横截面积≥9.52mm（⅜in），厚度>5.16mm（0.203in）、宽度≤152.4mm(6in)，或厚度≥5.84mm（0.230in）、宽度≤203.3mm（8in）的扁材，小型角钢、槽钢、T形钢和其他横截面积<76mm(3in)的标准型材，以及水泥钢筋。“型材”一词包括结构型材和特殊型材。结构型材是折边的，其截面至少有一个方向上的尺寸为76mm或以上，并作为结构件用于如桥梁、建筑、轮船和机车车厢。特殊型材按用户的特定用途设计使用。

尺寸和公差

热轧钢棒材和型材的名义尺寸是按其英寸或毫米数及其适用公差来命名的，如ASTM技术规范A6和A29。

表面缺陷

接缝和叠层。这是热轧棒材和型材最为常见的缺陷，它们显示为纵向裂缝。接缝就是钢材上闭合起来的裂隙，但并没有焊合在一起。叠层有些类似于轧制产生的毛刺或凸起被压陷进入棒材表面的缺陷。

表面缺陷允差。经验表明，当采购者订购的热轧或经热处理棒材用于切削加工时，采购者最好为去除表面缺陷而设定适当的加工裕量，并以此规定订货的尺寸。这些允差取决于表面金属被切削掉的方式、棒材的长度与大小、其直线度、公差的大小以及圆度公差。棒材在切削加工之前一般都要进行校直。对于特殊特性的碳素钢棒材和常规特性的合金钢棒材，无论进行加硫处理与否，都建议根据无心切削或无心磨削的棒材适当确定毛坯的加工裕量不小于下表所列的数值。

棒材直径		推荐最小单面加工裕量（规定尺寸的百分比,%）	
mm	in	未经硫化	经硫化
≤51	≤2	2.6	3.4
>51	>2	1.6	2.4

注意确定以上裕量的条件是棒材应符合其直线度公差。还有，由于直线度是长度的函数，故以中心顶尖夹持车削的长棒材时，应该增加其加工裕量。对于要进行磁粉检测的钢棒材，推荐所增加的毛坯切削裕量如表2.3-45所示。

表2.3-45　要进行磁粉检测的钢棒材的最小毛坯切削裕量推荐值

热轧尺寸		表面的最小切削裕量①	
mm	in	mm	in
至12.7	至½	0.76	0.030
>12.7~19	>½~¾	1.14	0.045
>19~25	>¾~1	1.52	0.060
>25~38	>1~1½	1.90	0.075
>38~51	>1½~2	2.29	0.090
>51~64	>2~2½	3.18	0.125
>64~89	>2½~3½	3.96	0.156
>89~114	>3½~4½	4.75	0.187
>114~152	>4½~6	6.35	0.250
>152~191	>6~7½	7.92	0.312
>191~229	>7½~9	9.52	0.375
>229~254	>9~10	11.10	0.437

①圆棒直径上的最小切削量为毛坯表面最小加工裕量的两倍。

产品要求

热轧钢棒材和型材可以按照化学成分的范围或极限值、力学性能、或两者同时进行生产。热轧钢棒材和型材的力学试验包括拉伸、布氏或洛氏硬度、弯曲、夏比冲击、断裂韧度和短时高温试验，以及有关弹性极限、比例极限和条件屈服强度试验，后者试验都要求使用伸长测量仪或画出应力-应变曲线。所有这些试验都包括在ASTM A370及其他ASTM的标准里。

有时还要求一些试验包括晶粒大小和淬硬性的测量测定。奥氏体晶粒大小是用马克奎德-恩(McQuaid-Ehn Test)试验进行测定的，ASTM E112规定的就是这个试验。该试验还包括渗碳试件的金相分析，以此观察前期奥氏体晶粒边界。淬硬性可以用若干种方法测定，最普通的是由ASTM A255规定的约米尼端部淬火(Jominy end-quench test)试验(见本章第12节)。

其致密性和均质性可以通过断裂试验进行评价。断裂试验一般用于高碳轴承特性钢。每一个案例都应当对取样部位、试验次数、试验方法细节及试验的可接受极限值一一作出规定。

非金属夹杂物的测试是通过对所制备和抛光样件的金相显微镜(100×)仔细观察而进行的。金相样件应当取之于在产品的表面与中心线之间的沿纵向中间层面上的材料。对于每一次案例都规定取样部位、试验次数和试验结果的处理解释。ASTM E 45规定了通用的试验步骤。

拉伸试验和硬度测试是热轧钢棒材和型材中最为普通的力学试验。硬度是一种测试相对简单的性能，与抗拉强度有密切的关系，如图2.3-3所示。当把图2.3-4与图2.3-3一起使用时，通过简单的硬度测试就可以估计屈服强度、伸长率以及抗拉强度。

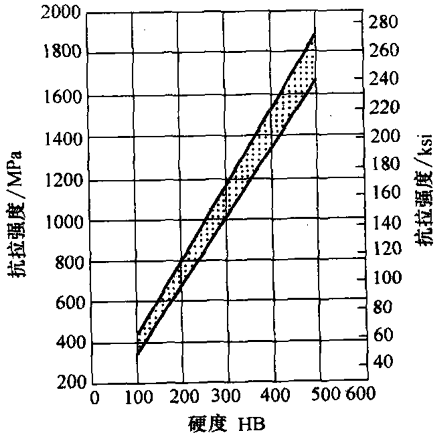


图2.3-3　钢的硬度与抗拉极限之间的关系。这里所讨论的热精轧钢的硬度适用范围为300HB

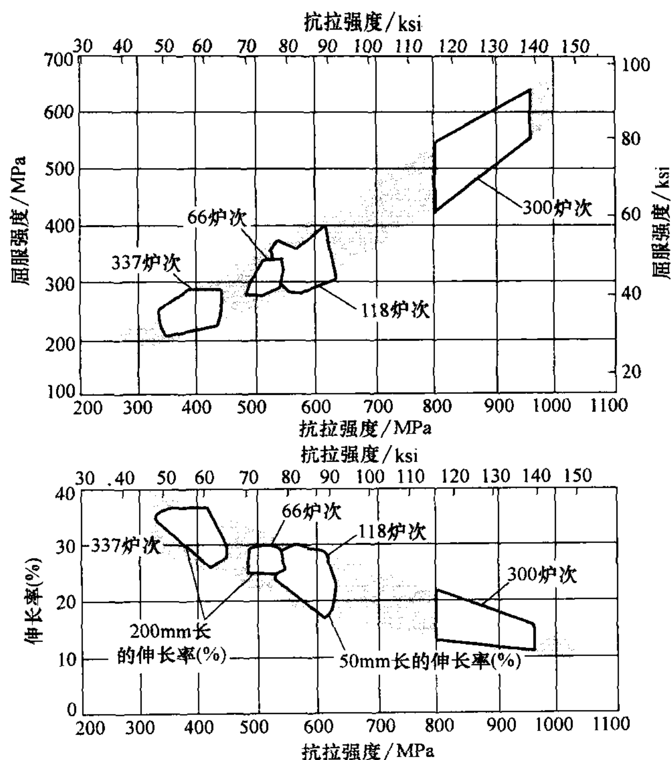


图2.3-4 热轧碳素钢拉伸性能关系

为碳素钢或合金钢棒材设定确定的轧制状态下抗拉强度或硬度的极限值是不现实的。对于轧制退火钢棒材，可以期待有一个对所有牌号钢都适用的最大抗拉强度值和最大硬度值(表2.3-46)。对正火状态的钢棒材可以规定其最大硬度、最大抗拉强度或最小硬度、最小抗拉强度。对于正火并回火钢棒材和淬火并回火钢棒材，无论是最大或最小硬度还是最大或最小抗拉强度都可以规定；这两种性能所规定的范围都随抗拉强度而改变，并且对于正火并回火钢棒材，其范围为相当于在任何规定部位布氏压痕直径的0.4mm之内，而对于淬火并回火钢棒材，则为0.3mm。

产品的种类

热轧碳素钢棒材是按照两种主要的特性级别进行生产的：商品级和特殊级。商品特性是比较低的特性级别，它不适用于任何对内部致密性和表面缺陷均需严格控制的应用。特殊特性包括所有与终端使用有关并且有严格特性要求的棒材种类。

表2.3-46 对于一般轧制退火的热轧钢棒材、方坯和扁坯可以接受的最低的最高硬度值

钢牌号	最高硬度[①] HB		钢牌号	最高硬度[①] HB	
	校直的	未校直的		校直的	未校直的
碳素钢			**合金钢**		
1141	201	192	4027	170	163
1144	207	197	4028	170	163
1151	207	201	4037	192	183
1541	207	197	4047	212	201
1548	212	207	4118	170	163
1552	212	207	4130	183	174
15B41	207	197	4137	201	192
15B48	212	207	4140	207	197
合金钢			4142	212	201
1330	187	179	4145	217	207
1335	197	187	4147	223	212
1340	201	192	4150	235	223
1345	212	201	4161	241	229
4012	149	143	4320	207	197
4023	156	149	4340	235	223
4024	156	149	4419	170	163

（续）

钢牌号	最高硬度① HB		钢牌号	最高硬度① HB	
	校直的	未校直的		校直的	未校直的
合金钢			**合金钢**		
4615	174	167	51B60	235	223
4620	179	170	6118	163	156
4621	179	170	6150	217	207
4626	187	179	81B45	201	192
4718	179	170	8615	163	156
4720	170	163	8617	163	156
4815	223	192	8620	170	163
4817	229	197	8622	179	170
4820	229	197	8625	179	170
5015	156	149	8627	183	174
50B44	207	197	8630	187	179
50B46	217	201	8637	201	192
50B50	217	201	8640	207	197
50B60	229	217	8642	212	201
5120	170	163	8645	217	207
5130	183	174	8655	235	223
5132	187	179	8720	170	163
5135	192	183	8740	212	201
5140	197	187	8822	187	179
5145	229	197	9254	241	229
5147	217	207	9255	241	229
5150	212	201	9260	248	235
5155	229	217	94B17	156	149
5160	235	223	94B30	183	174

①有特殊显微组织要求的必须修正这些硬度值。

商品特性棒材

商品特性是热轧钢棒材中要求最不严格的级别。商品特性的棒材用于制造桥梁、建筑、轮船、农业机械、筑路机械、铁道机具和一般的机器设备上不重要的零件。在这些应用中只要求进行平缓的冷弯和热压成形，以及冲压和焊接。平缓的冷弯就是用大半径进行弯曲，而且其弯曲的轴线与其轧制的方向成为直角。

牌号。商品特性棒材的生产要同时满足化学成分（只需熔炼分析）和力学性能的要求。其化学成分的供应范围（质量分数）为0.50%C（最高）、0.60%Mn（最高）、0.04%P（最高）和0.05%S（最高），但是生产无需满足任何特定的硅含量、晶粒大小或其他用于表明所生产钢材种类的要求。

商品特性的钢棒材并不要求标准钢材所常用的化学成分范围。它们可按较宽的碳含量和锰含量生产，并用字头“M”标记之。

力学性能。当订购需要满足力学性能的商品特性的棒材时，可选用以下强度范围，最大值可达655MPa(95ksi)：

- 70MPa(10ksi)，最小至415MPa(60ksi)不含。
- 80MPa(12ksi)，最小从415MPa(60ksi)至460MPa

(67ksi)不含。

- 100MPa(15ksi)，最小从460MPa(67ksi)至550MPa(80ksi)不含。

技术规范ASTM A663规定了热锻商品特性碳素钢棒材和按棒材尺寸的型材，适用于不太重要的结构用途。

尺寸。商品特性圆钢生产的直径不超过76mm(3in)。

特殊特性钢

当商品特性棒材无法满足其最终用途、制造方法或后续处理工艺所要求的特征时，就要使用特殊特性钢棒材。包括许多结构用途在内的典型的应用都要求热锻、热处理、冷拉、冷压和切削加工。

特殊特性棒材要求不存在可看得见的缩管和过度的化学成分偏析。另外，必要时还必须使用经过检验和精整的初轧坯和方坯开始轧制，以便将表面缺陷减少到最低限度。

力学性能。某些特殊特性的钢棒材要满足特定的力学性能生产，拉伸性能与前面所述的商品特性棒材的相一致。

尺寸。特殊特性的钢棒材的截面尺寸一般按下面的尺寸规格生产：

- 圆形的：6.4~254mm(¼~10in)；
- 方形的：6.4~154mm(¼~6 1/16in)；
- 圆棱角的方形：9.5~203mm(⅜~8in)；
- 六角形的：9.5~103mm(⅜~4 1/16in)；
- 扁的：厚度>5.16mm(0.203in)、宽度≤152mm(6in)，或厚度≥5.84mm(0.23in)、宽度≤203mm(8in)。

合金钢棒材

热轧合金钢棒材一般按照与特殊特性钢棒材一样的尺寸范围进行生产的。热轧合金钢和高强度低合金钢棒材都属于ASTM技术规范的范畴(表2.3-47和表2.3-48)。在这些技术规范里所包含的许多合金也都是SAE-AISI的标准牌号。热轧合金钢棒材也应用于轴承和飞机上的一些零件。轴承特性钢将在本章第8节里阐述。飞机特性钢常按照航空材料技术规范(AMS)生产。

表2.3-47 结构特性钢棒材和结构钢型材的典型的ASTM技术规范。摘自ASTM A6

技术规范	钢的种类及条件
碳素钢	
A36①②	碳素钢厚钢板、棒材和型材
A131③	用于轮船的碳素钢和HSLA钢厚钢板、棒材、型材和铆钉
A529	屈服强度为290MPa(42ksi)以上的碳素钢厚钢板、棒材、型材和薄钢板桩
A709	用于桥梁的碳素钢、合金和HSLA钢厚钢板、棒材和型材
合金钢	
A710	时效硬化低碳钢Ni-Cu-Cr-Mo-Nb和Ni-Cu-Nb合金钢厚钢板、棒材和型材
高强度低合金(HSLA)钢	
A131③	用于轮船的碳素钢和HSLA钢厚钢板、棒材、型材和铆钉
A242	HSLA钢厚钢板、棒材和型材
A572	Nb-V HSLA钢厚钢板、棒材、型材和薄钢板桩
A588	屈服点最低为345MPa(50ksi)的HSLA钢厚钢板、棒材和型材
A633	正火HSLA钢厚钢板、棒材和型材
A690	在海洋环境中使用的HSLA钢H-板桩和薄钢板桩

①该ASTM技术规范也由美国机械工程师学会颁布，在A前加S。 ②也见加拿大标准协会(CSA)技术规范G40.8。③也见ABS技术规范的39章。

表2.3-48 热轧钢棒材的典型ASTM技术规范

技术规范	钢的种类及条件
碳素钢	
A321①	调质钢棒材
A575①	商品特性碳素钢棒材

（续）

技术规范	钢的种类及条件
碳素钢	
A576①	特殊特性碳素钢棒材
A663①	符合力学性能要求的商品特性碳素钢棒材
A675①	符合力学性能要求的特殊特性碳素钢棒材
合金钢	
A295	轴承特性的高碳铬钢方坯、锻件、圆管、圆钢和管材
A304①	符合最终淬火的淬硬性要求的合金钢棒材
A322①	用于常规建设用途的合金钢棒材
A434①	调质钢棒材，热轧或冷精轧
A485	按高淬硬性改进的轴承特性的高碳铬钢方坯、圆管、棒材和管材
A534	渗碳合金钢方坯、圆管、棒材、圆钢、线材和轴承特性管材
A535	用于制造耐磨轴承的特殊特性的合金钢方坯、圆管、棒材、圆钢和管材

注：用于结构特性的棒材和型材的 ASTM 技术规范，见表2.3-47。

①摘自 ASTM A29。

冷精加工钢棒材

冷精加工钢棒材是碳素钢和合金钢的产品（圆形、方形、六角形、扁形或特殊形状），其生产就是利用冷拉、冷压、车削、磨削或抛光（单独工序或其组合）的方法对热锻的棒材进行冷精加工，以此得到在整个长度上均匀一致的定长直料或盘料，这里不包括平轧的产品，如通常冷轧的冷精加工所得到的薄钢板、带钢或厚钢板，也不包括冷拉管制品。

冷精加工棒材分为五大类：冷拉棒材，车削和抛光（在冷拉或热轧之后）棒材，冷拉、磨削和抛光（在冷拉之后）棒材，车削、磨削和抛光棒材，以及磨削和抛光棒材。

冷拉棒材的生产量是最大的，并且广泛地应用于切削加工及其他零件的批量生产中。它们有诱人的力学和尺寸的综合性能。

车削和抛光棒材不但具有热轧产品的力学性能，还能大大提高表面粗糙度和尺寸精度。它们可以在尺寸上大于冷拉的棒材。车削棒材还少有缺陷和脱碳。

冷拉、磨削和抛光棒材具有比冷拉棒材更高的切削性能、抗拉强度和屈服强度，以及同时有非常小的尺寸公差。然而冷拉、磨削和抛光棒材却不能确保免除缺陷。

车削、磨削和抛光棒材有超级表面粗糙度、尺寸精度和直线度。这种棒材应用于精密轴系和电镀上，为此这些特点是极为重要的。

冷拉、车削、磨削和抛光棒材不仅能提高力学性能，还有小的尺寸公差，并能使表面免除缺陷。

棒材尺寸

冷精加工棒材有很大的尺寸和横截面形状变化范围。通常它们是以定长直料供货的，但是有些尺寸和截面形状是以盘料提供的。冷精加工棒材可以米制或英制的名义尺寸代号。冷精加工产品是以标准尺寸增量在其尺寸范围里变化的。特殊尺寸可以根据热轧机的递增和冷精加工的工装情况协议订货。表2.3-49所示是市场上供应的棒材尺寸规格。

表2.3-49　冷精加工钢棒材的市场尺寸规格

截面形式	最小厚度或直径		最大厚度或直径		尺寸递增量		常用长度	
	mm	in	mm	in	mm	in	m	ft
圆形	3.2	0.125	305	12	0.8～25 1.6～75 3.2～152	1/32～1 1/16～3 1/8～6	3.0～3.7或 6.1～7.3	10～12或 20～24
方形	3.2	0.125	152	6	1.6～38 3.2～70	1/16～1 1/2 1/8～2 3/4	3.0～3.7	10～12

（续）

截面形式	最小厚度或直径		最大厚度或直径		尺寸递增量		常用长度	
	mm	in	mm	in	mm	in	m	ft
六角形	3.2	0.125	102	4	1.6～50 6.4～102	1/16～2 1/4～4	3.0～3.7	10～12
扁形	3.2厚× 6.4宽	0.125厚× 0.25宽	76×371	3厚× 14⅝宽	1.6～17 3.2～44 6.4～76	1/16～11/16 1/8～1¾ 1/4～3	3.0～3.7	10～12

产品种类

在冷精加工棒材的制造过程中，钢材首先热轧到尺寸稍大的合适形状，然后经过机械加工工序（并非那种主要为了去除氧化皮的工序），因此影响其切削性、直线度及其加工的最终性能。如上所述棒材的冷精加工一般由两种方法：①车削、磨削或两者联用把表面的材料除去；②利用适当的设备将材料从有适当形状的拉模里拔出。

商业牌号。能够热轧的任何牌号的碳素钢或合金钢也可以进行冷精加工。牌号的选择是根据为获得必要的力学性能所能采用的冷精加工和/或淬硬性及其回火特征。

以w(C)低于0.55%的牌号为最普通的冷拉碳钢。超过该含碳量的牌号必须在冷拉之前进行退火，因此而增加成本，而且经退火和冷拉的最终力学性能将比含碳量低而直接从热轧毛坯进行冷拉的还要差。经过退火的高碳牌号钢的切削性能可以得到一些改善。

w(C)超过0.38%的合金钢一定要在冷拉之前进行退火。

经切削的棒材。采用毛坯切削进行冷精加工的棒材产品可以有：车削和抛光，车削、磨削和抛光，冷拉、磨削和抛光，冷拉、车削和抛光，以及冷拉、车削、磨削和抛光。车削是在特殊机床上用装于旋转头上的刀具进行加工，这样就排除了在一般的车床上加工长棒所需要的装夹问题。磨削是用无心磨床加工的。抛光可以利用抛光辊子在交叉轴（Medart米达特）的校直机上进行。抛光是用有机轮进行磨削，有时也用布带。

对于车削和用于车削并磨削的棒材，其经抛光的直径范围为13～229mm含（1/2～9in含）；用于冷拉并磨削的棒材，为3.2～102mm含（1/8～4in含）。这是作为整个工业所覆盖的范围，具体到某一生产厂家不会供应全部规格的产品。例如一家知名的厂家生产13～229mm（1/2～9in）的产品，而另一家只生产29～203mm（1⅛～8in）的全部精加工规格的产品。

规格一直到38mm（1½in）的棒材，其毛坯的车削或车削并磨削的加工裕量按直径计通常为1.6mm（1/16in）；而规格从38～76mm（1½～3in）范围的棒材，为3.2mm（1/8in）；规格从76～127mm（3～5in）范围的棒材，为4.8mm（3/16in）；规格127mm（5in）以上的棒材，为6.4mm（1/4in）。

冷拉圆钢。它适用于直径规格从3.2～152mm（1/8～6in）。然而作为个别生产商能生产的最大直径可以从76～152mm（3～6in）。通过冷拉其直径的缩减量（即称为减面量），对于精轧尺寸达到9.5mm（3/8in）的通常为0.79mm（1/32in），对于9.5mm（3/8in）以上的规格为1.6mm（1/16in）。一些特殊的工艺可以用较大的减面量，但之后要进行应力消除。有厂家在高温下使用大的减面量。在这种特殊情形里，拉制工序是让其材料从室温开始，然后其温度也是棒料因拉制而引起的逐步升高，这种温度的升高是很小的和微不足道的。

本来，冷精加工无论是车削还是拉制都是为了用于生产规格尺寸公差较小、表面光滑的棒材。但随着冷精加工产品的不断开发和改进，人们更加关注如何通过冷加工来有效提高其力学性能。实际上现在有大约40%的应用是把提高力学性能作为其重要考虑，这说明这种额外的优势更为人们所重视。在这些应用中大约有一半，或总应用20%的冷拉仅仅用于提高强度，除了提高强度之外，另外的20%是为了得到更小的尺寸公差和更好的表面粗糙度。

经轧制的、微量合金化的高强度低合金（HSLA）钢通过不同方式组合的拉制和炉内处理而使其性能得到拓展。作为一种高百分比的无屑钢材，都是通过冷轧同时获得尺寸的精度和切削性能的提高。最近，由于微量合金化钢材的发展，使得在一定的情况下通过热轧并车削得到的棒材能具有与冷拉的非微量合金化

钢材相似的力学性能。

车削与冷轧的比较。在以车削为精加工和以冷轧为精加工之间存在着一些本质上的差别。首先，很明显车削和无心磨只能适用于圆形的棒材，而拉制可以用于各种不同的形状。因此拉制比车削的应用更为广泛。

第二，在它们的表面可能存在着不同数量和不同严重程度的缺陷。因为在车削和磨削时，毛坯裕量被切除，其浅层的表面缺陷和脱碳会完全消除。而当材料经受拉制时，毛坯只是发生变形，而表面缺陷被压缩进深层中。

冷精加工的产品根据其形状、含碳量和热处理适用于不同的尺寸公差。表2.3-50～表2.3-52所示就是由ASTM A29公布的冷精加工的碳素钢和合金钢棒材的尺寸公差。这些表格包括冷拉棒材，车削和抛光圆钢，冷拉、磨削和抛光圆钢，以及车削、磨削和抛光圆钢。可以从表2.3-50～表2.3-52说明某种通则。例如，对于冷轧的与车削、抛光的圆钢的尺寸公差，其规格直到102mm含(4in含)都是一样的。然而适用于碳素钢和合金钢的公差却是不相同的。对于多种最终加工方法，其适用的公差也是依随一定的含碳量而变化的。冷精加工之前，要进行热处理的棒材适用的公差较大一些。相应的，要进行磨削的棒材，其公差较小，并且这些公差与含碳量是无关的。

表2.3-50　冷精加工即经冷拉或车削再抛光的碳素钢棒材的尺寸公差

尺寸规格		尺寸公差									
		最大 $w(\mathrm{C})$(%)								在冷精加工之前，所有碳素钢都要进行调质或正火	
		$w(\mathrm{C}) \leqslant 0.28$		$0.28 < w(\mathrm{C}) \leqslant 0.55$		$w(\mathrm{C}) \leqslant 0.55$，包括冷精加工之后的应力消除或退火		$w(\mathrm{C}) > 0.55$			
mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
圆形——冷拉(尺寸直至102mm或4in)或车削并抛光											
至38含	至1½含	-0.05	-0.002	-0.08	-0.003	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.13	-0.005
>38～64含	>1½～2½含	-0.08	-0.003	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.15	-0.006
>64～102含	>2½～4含	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.18	-0.007	-0.18	-0.007
>102～152含	>4～6含	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.18	-0.007	-0.20	-0.008	-0.20	-0.008
>152～203含	>6～8含	-0.15	-0.006	-0.18	-0.007	-0.20	-0.008	-0.23	-0.009	-0.23	-0.009
>203～229含	>8～9含	-0.18	-0.007	-0.20	-0.008	-0.23	-0.009	-0.25	-0.010	-0.25	-0.010
六角形——冷拉											
至19含	至¾含	-0.05	-0.002	-0.08	-0.003	-0.10	-0.004	-0.15	-0.006	-0.15	-0.006
>19～38含	>¾～1½含	-0.08	-0.003	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.18	-0.007	-0.18	-0.007
>38～64含	>1½～2½含	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.20	-0.008	-0.20	-0.008
>64～80含	>2½～3⅛含	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.18	-0.007	-0.23	-0.009	-0.23	-0.009
>80～102含	>3⅛～4含	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	—	—	—	—	—	—
方形——冷拉①											
至19含	至¾含	-0.05	-0.002	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.18	-0.007	-0.18	-0.007
>19～38含	>¾～1½含	-0.08	-0.003	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.20	-0.008	-0.20	-0.008
>38～64含	>1½～2½含	-0.10	-0.004	-0.15	-0.006	-0.18	-0.007	-0.23	-0.009	-0.23	-0.009
>64～102含	>2½～4含	-0.15	-0.006	-0.20	-0.008	-0.23	-0.009	-0.28	-0.011	-0.28	-0.011
>102～127含	>4～5含	-0.25	-0.010	—	—	—	—	—	—	—	—
>127～152含	>5～6含	-0.36	-0.014	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

尺寸规格		尺寸公差									
		最大 w(C)(%)								在冷精加工之前，所有碳素钢都要进行调质或正火	
		w(C) ≤ 0.28		0.28 < w(C) ≤ 0.55		w(C) ≤0.55，包括冷精加工之后的应力消除或退火		w(C) >0.55			
mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
扁形①②											
至19含	至¾含	-0.08	-0.003	-0.10	-0.004	-0.15	-0.006	-0.20	-0.008	-0.20	-0.008
>19~38含	>¾~1½含	-0.10	-0.004	-0.13	-0.005	-0.20	-0.008	-0.25	-0.010	-0.25	-0.010
>38~75含	>1½~3含	-0.13	-0.005	-0.15	-0.006	-0.25	-0.010	-0.30	-0.012	-0.30	-0.012
>75~102含	>3~4含	-0.15	-0.006	-0.20	-0.008	-0.28	-0.011	-0.40	-0.016	-0.40	-0.016
>102~152含	>4~6含	-0.20	-0.008	-0.25	-0.010	-0.30	-0.012	-0.50	-0.020	-0.50	-0.020
>152	>6	-0.33	-0.013	-0.38	-0.015	—	—	—	—	—	—

注：本表所列公差适用于冷精加工之前经退火、球化退火、正火、正火加回火或调质处理的棒材。然而本表所列公差不适用于冷精加工之后进行退火、球化退火、正火、正火加回火或调质处理的棒材。生产厂家可以查询有关棒材的公差。

①公差带可以完全按正值或正负值设置，但其双向之和应与表中所列等同。　②对于扁形棒材的宽度和厚度来说，其公差均由宽度决定，例如当 w(C) 低于 0.28% 的扁形棒材宽为 50mm(2in)、厚为 25mm(1in) 时，其宽度公差为 0.13mm (0.005in)，则厚度公差也与之相同，接近 0.13mm(0.005in)。

表 2.3-51　冷精加工即经冷拉或车削再抛光的合金钢棒材的尺寸公差

尺寸规格		尺寸公差									
		最大 w(C)(%)								冷精加工之前，所有含碳牌号都要进行调质（热处理）或正火	
		w(C) ≤ 0.28		0.28 < w(C) ≤ 0.55		w(C) ≤0.55，包括冷精加工之后的应力消除或退火		w(C) >0.55 在冷精加工之后，是否需要应力消除或退火			
mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
圆形——冷拉(尺寸直至102mm或4in)或车削并抛光											
卷材至25含	至1含	0.05	0.002	0.08	0.003	0.10	0.004	0.13	0.005	0.13	0.005
长材至38含	至1½含	0.08	0.003	0.10	0.004	0.13	0.005	0.15	0.006	0.15	0.006
>38~64含	>1½~2½含	0.10	0.004	0.13	0.005	0.15	0.006	0.18	0.007	0.18	0.007
>64~102含	>2½~4含	0.13	0.005	0.15	0.006	0.18	0.007	0.20	0.008	0.20	0.008
>102~152含	>4~6含	0.15	0.006	0.18	0.007	0.20	0.008	0.23	0.009	0.23	0.009
>152~203含	>6~8含	0.18	0.007	0.20	0.008	0.23	0.009	0.25	0.010	0.25	0.010
>203~229含	>8~9含	0.20	0.008	0.23	0.009	0.25	0.010	0.28	0.011	0.28	0.011
六角形——冷拉											
至19含	至¾含	0.08	0.003	0.10	0.004	0.13	0.005	0.18	0.007	0.18	0.007
>19~38含	>¾~1½含	0.10	0.004	0.13	0.005	0.15	0.006	0.20	0.008	0.20	0.008
>38~64含	>1½~2½含	0.13	0.005	0.15	0.006	0.18	0.007	0.23	0.009	0.23	0.009
>64~80含	>2½~3⅛含	0.15	0.006	0.18	0.007	0.20	0.008	0.25	0.010	0.25	0.010

（续）

尺寸规格		尺寸公差									
		最大 w(C)(%)								冷精加工之前，所有含碳牌号都要进行调质（热处理）或正火	
		w(C) ≤ 0.28		0.28 < w(C) ≤ 0.55		w(C) ≤0.55，包括冷精加工之后的应力消除或退火		w(C) >0.55 在冷精加工之后，是否需要应力消除或退火			
mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
六角形——冷拉											
>80 ~ 102 含	>3⅛ ~4 含	0.15	0.006	—	—	—	—	—	—	—	—
方形——冷拉											
至 19 含	至¾含	0.08	0.003	0.13	0.005	0.15	0.006	0.20	0.008	0.20	0.008
>19 ~ 38 含	>¾ ~1½含	0.10	0.004	0.15	0.006	0.18	0.007	0.23	0.009	0.23	0.009
>38 ~ 64 含	>1½ ~2½含	0.13	0.005	0.18	0.007	0.20	0.008	0.25	0.010	0.25	0.010
>64 ~ 102 含	>2½ ~4 含	0.18	0.007	0.23	0.009	0.25	0.010	0.30	0.012	0.30	0.012
>102 ~ 127 含	>4 ~5 含	0.28	0.011	0.23	—	0.25	—	0.30	—	0.30	—
扁形[①]											
至 19 含	至¾含	0.10	0.004	0.13	0.005	0.18	0.007	0.23	0.009	0.23	0.009
>19 ~ 38 含	>¾ ~1½含	0.13	0.005	0.15	0.006	0.23	0.009	0.28	0.011	0.28	0.011
>38 ~ 75 含	>1½ ~3 含	0.15	0.006	0.18	0.007	0.28	0.011	0.33	0.013	0.33	0.013
>75 ~ 102 含	>3 ~4 含	0.18	0.007	0.23	0.009	0.30	0.012	0.43	0.017	0.43	0.017
>102 ~ 152 含	>4 ~6 含	0.23	0.009	0.28	0.011	0.33	0.013	0.52	0.021	0.52	0.021
>152	>6	0.36	0.014	—	—	—	—	—	—	—	—

注：本表所列公差适用于冷精加工之前经退火、球化退火、正火、正火加回火或调质处理的棒材。然而本表所列公差不适用于冷精加工之后进行退火、球化退火、正火、正火加回火或调质处理的棒材。可以向生产厂家查询有关棒材的公差。

①对于扁形棒材的宽度和厚度来说，其公差是由宽度决定的，例如当 w(C) 低于 0.28% 的扁形棒材，宽为 50mm(2in)、厚为 25mm(1in) 时，其宽度公差为 0.13mm(0.005in)，则厚度公差与之相同，接近 0.13mm(0.005in)。

表 2.3-52 冷精加工即经冷拉、磨削和抛光，或车削、磨削和抛光的碳素钢合金钢棒材的尺寸公差

尺寸规格				按规定尺寸确定的公差	
冷拉、磨削和抛光		车削、磨削和抛光			
mm	in	mm	in	mm	in
至 38 含	至 1½含	至 38 含	至 1½含	−0.03	−0.001
>38 ~ 64 含	>1½ ~2½不含	>38 ~64 含	>1½ ~2½不含	−0.04	0.0015
>64 ~ 76 含	≥2½ ~3 含	>64 ~ 76 含	≥2½ ~3 含	−0.05	−0.002
>76 ~ 102 含	>3 ~4 含	>76 ~ 102 含	>3 ~4 含	−0.08	−0.003
—	—	>102 ~ 152 含	>4 ~6 含	−0.10[①]	−0.004[①]
—	—	>152	>6	−0.13[①]	−0.005[①]

含：指包括；不含：指不包括。

① 对于无硫化钢材（指 w(S) 低于 0.08% 的钢）或进行热处理的钢，其公差增加 0.03mm(0.001in)。

碳素钢特性标记

标准特性。这是用于表示所生产的冷精加工碳素钢能达到的基本特性的标记。标准特性的冷精加工棒材是用热轧的特殊特性碳素钢生产得到的(用于冷精加工的热轧棒材所适用的标准特性)。标准特性的钢棒材必须不含肉眼可辨的缩管以及过度的化学成分的偏析。它们也会有一些表面缺陷，一般来说，表面缺陷的大小随棒材的尺寸而增加。

有特定要求的特性 A(RRA)。它综合上述标准特性碳素钢棒材的全部特征，再加上任何下列限制要求之一。

特殊表面棒材，就是通过特殊的表面处理方法将表面披缝及其他表面缺陷的数量和大小降低到最低限度。这种棒材用于其切削裕量不足以通过表面切削将产生在标准特性棒材上的有害缺陷都去除的用途。

特殊内部致密棒材，其化学成分的偏析和孔穴要少于标准特性棒材的。

特殊淬硬性棒材，按照标准 H-钢所无法满足的淬硬性要求进行生产的。

冷精加工碳素钢棒材，按照用标准的非金属夹杂物试验方法测定的夹杂物评定值进行生产的。

有特定要求的特性 B(RRB)。它综合上述标准特性碳素钢棒材的全部特征，再加上任何下列限制要求之一。

特殊废料，当化学成分的最低偏析、钢的特别清洁度或内部的致密性要求产品必须取材于钢锭的特定部位时，需对其作出的规定。

脱碳最小化，为了表面硬度要求而进行热处理时应考虑会发生脱碳，这时需对其最小化作出规定。

单一性限定，除了以上所述，如特殊化学成分极限值、特殊工艺技术和其他未及预料的特殊性特征，都包含在这个特性层面里。

多特定要求特性(MRR)。用于包含两个或两个以上的上述限定要求。

冷锻特性 A 和冷挤压特性 A。用于以冷态塑性变形的方法生产实心或空心形状的零件的冷精加工碳素钢棒材；其变形也就是在表面无法扩张的压缩下使金属发生移动，并且不要求特殊的检验标准。

冷镦特性、冷挤压特性 B、冷镦锻特性和冷扩特性。用于以冷镦、冷挤压、冷镦锻或冷扩的方法使之发生强烈的冷态塑性变形，以此生产实心或空心形状零件的冷精加工碳素钢棒材，其变形也就是通过延伸和/或压缩使金属发生移动。这种棒材是用严密受控的炼钢工艺所生产的钢加工得到的，并且按专用标准检验其内部的致密性、表面质量和化学成分的均匀性。对于最高含碳量(质量分数)在 0.30% 或以上的那些牌号钢，都要求进行退火或球化退火的热处理，以此为冷加工获取适宜的硬度和显微组织。

特定的冷加工特性。用于以包括延伸或压缩的非常强劲的冷态塑性变形的冷加工方法生产实心或空心形状零件的冷精加工碳素钢棒材。

其他碳素钢特性。下面所列的特性标记适用于特定要求和用途的冷精加工碳素钢棒材中的一部分。它们可以具有用其生产的产品技术规范所提出的如表面特性、废品率、宏观浸蚀试验、力学性能或化学成分均匀性等要求。

- 传动轴特性。
- 深拉制品用钢特性 A。
- 深拉制品用钢特性 C。
- 来复枪筒特性。
- 火花塞特性。

合金钢特性标记

常规特性。这是适用于基本或标准特性等级的标记，冷精加工合金钢棒材就是按此等级而生产的。作为这种特性的钢材是经镇静处理的，并通常能生产得到很细的晶粒大小。它们通过熔炼达到化学成分的规定范围和极限值，并且经过检验和试验，满足作为常规结构合金钢用途的一般性要求。常规特性的冷精加工合金钢棒材会带有某些表面缺陷。一般来说表面上的有害缺陷的大小是随棒材规格尺寸而增加的。

冷镦头特性。用于通过镦粗、墩头或锻造的方法实现的冷态塑性变形的用途上的冷精加工合金钢棒材。其棒材是采用严密受控的炼钢工艺所生产的钢加工得到的，并经过规定的轧制试验和检验，以确保内部的致密性、化学成分的一致性，并防止产生有害的表面缺陷。通过热处理和冷加工适当地控制硬度和显微组织对于冷成形来说是很重要的。大部分冷镦特性的合金钢都是低碳和中碳牌号的钢。

特殊冷镦头特性。用于当轻微的表面缺陷也会造成零件开裂时，为进行强劲的冷态塑性变形而采用的冷精加工合金钢棒材。这种棒材的特性利用严密受控的炼钢工艺获取材料均匀一致的化学成分和内部致密性。还有，在生产的中间过程应用特殊的工艺(例如磨削)去除表面有害的缺陷。通过热处理和冷加工适当地控制硬度和显微组织对于冷成形加工来说是很重要的。

传动轴特性。用于制造汽车或卡车的动力传动轴的冷精加工合金钢棒材，这种传动轴根据其设计或制

造方法不必进行全部的切削加工，或只需预留比规定要少的毛坯切削余量，就可以清除一般的表面缺陷。

球和滚子轴承特性以及轴承特性。用于制造减摩轴承的冷精加工合金钢棒材。这种棒材通常是用SAE-AISI标准的渗碳合金钢牌号和SAE-AISI的高碳铬系列的钢生产的。这些钢也可以按照ASTM A534、A295和A485的标准进行生产(见本章第8节)。

飞机特性和磁粉特性。用于飞机上的重要的或高应力零件以及其他类似或相当用途上的冷精加工合金钢棒材，包含进一步的严格要求如磁粉检测、增加报废量、宏观浸蚀以及淬硬性控制。

其他合金钢特性。以下特性标记是指用于枪支、大炮、弹壳、炮弹及类似用途上的冷精加工合金钢棒材。它们会提出诸如报废量、宏观浸蚀试验、表面要求或磁粉检测等要求，并在其产品的技术规范中载明：

- 穿甲(AP)弹特性。
- 穿甲弹的磁通特性。
- 大炮特性。
- 来复枪筒特性。
- 弹壳特性。

力学性能

机加工和冷拉的圆棒的主要差别在于通过拉制的冷形变加工，其抗拉和屈服强度都得到提高。其冷形变加工还改变了应力-应变图，如图2.3-5所示。在工业压缩量的范围里，其冷形变加工会显著影响某些力学性能(见图2.3-6)。图2.3-7所示是棒材以压缩量为0.8mm和1.6mm(1/32 in和1/16in)的一般工业拉制和以压缩量为3.2mm和4.8mm(1/8in和3/16in)的重载

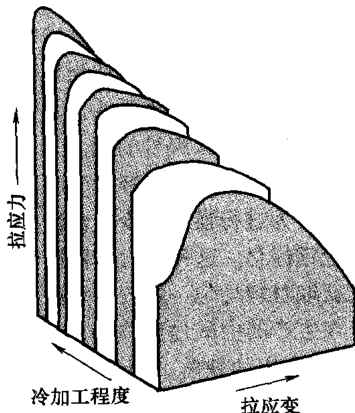


图2.3-5 冷加工对低碳钢的抗拉应力-应变曲线的影响

拉制时的不同横截面减缩百分比。正常的减面率很少有超过20%的，通常都低于12%。如图2.3-6所示，发生在此压缩范围(约达15%)之内的主要拉伸性能肯定会有较大的变化。

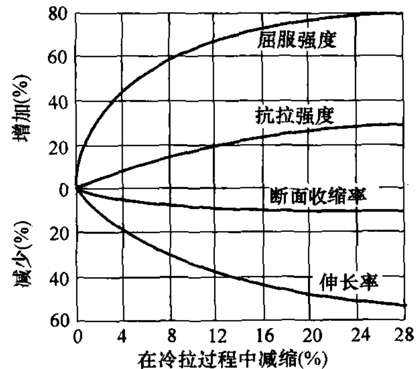


图2.3-6 冷拉对钢棒材的抗拉性能的影响。数据适用于棒材横截面达25mm(1in)，其冷拉前的抗拉强度为690MPa(100ksi)或更小

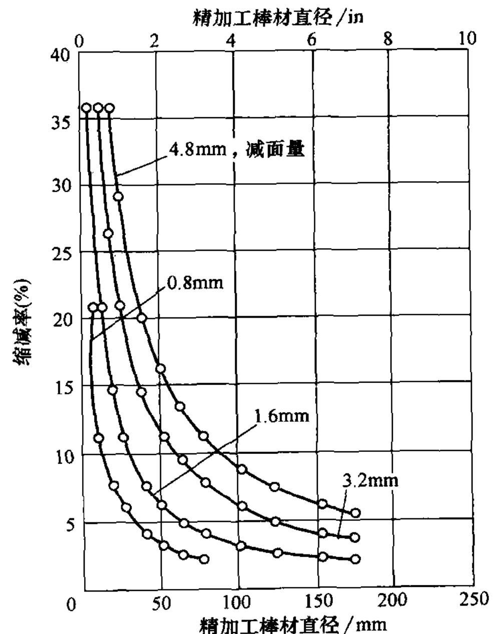


图2.3-7 拉拔对钢棒材的横截面减缩的影响

钢盘条

盘条是一种用方坯在圆钢轧机上轧制而成的半成品，主要用于制造钢丝线材。用于盘条的钢材可用所有各种的炼钢工艺生产得到，包括碱性氧吹转炉、碱性平炉和电炉等工艺。钢盘条通常被冷轧成为适当的线材，供进一步拉制，供冷轧、冷镦头、冷镦粗、冷

挤压或冷锻，或供热锻。

虽然盘条可以生产成多种常规截面形状，但是绝大部分都是圆形横截面。一般圆钢盘条生产的名义直径从5.6~18.7mm(7/32~47/64 in)，并以0.4mm(1/64 in)的增量递增。当圆钢从轧机里出来后就被盘成卷料。通常这些卷料的内径约为760mm(30in)，重量可达2000kg(4400lb)。一卷盘条的尺寸和最大重量决定于轧机的能力。有时把两卷或更多卷的盘条焊接在一起，这样得到的一卷盘条重量可以超过轧机的加工能力。直径的标准公差为±0.4mm(±1/64 in)，最大圆度为0.64mm(0.025in)。

盘条的生产商可以将其轧制的、清洁的和涂敷的，或热处理的产品在市场上销售，虽然用户一般愿意他们自行进行这些处理。这些工序将在下面的章节中阐述，并结合适用于钢盘条的各种辨别特性和商品分类。

制造工艺

清洁和涂层。钢盘条上的轧制氧化皮先通过酸洗或碱洗，再用清水冲洗进行清除，或者采用机械的方法如磨粒喷丸或通过滑轮的反向弯曲去除。盘条经化学清洗后都要接着补充进行涂敷工序。利用石灰、硼砂或磷化物涂层可作为一种润滑剂的载体使用，而润滑剂对于线材的后续工艺是十分必要的。在石灰涂敷过程中的操作工艺要根据客户的要求给盘条施用不同量的石灰。经磷化处理的盘条也可以辅之以石灰、硼砂、或水溶性皂液的涂敷。经机械方法去除氧化皮的盘条无需涂敷，仅使用钢丝拉制皂液进行拉制，或者以化学清洗盘条的那种方式进行涂层。

适用于盘条钢的常用热处理。无论在加工成线材之前还是在其过程之中，这种热处理包括退火、球化退火、铅淬火处理以及受控冷却。普通退火是将钢丝盘条加热到接近或低于其下临界温度，并在该温度维持足够长的时间，接着再缓慢冷却。这个过程可以把钢软化以备进一步加工，但是尚未达到球化退火的程度。球化退火是为了使显微组织中碳化物的形状改变为球形(球化)，即实现最大程度的软化，在接近或稍低于下临界温度下，延长加热时间(或者在下临界温度左右进行热的周期性变化)，随后再缓慢冷却。

铅淬火处理是一种仅适用于中-高-碳钢和高碳钢的热处理。在此过程中，将单股的盘条或线材加热超过上临界温度，然后在空气、融化盐浴、融化铅浴或流化床里以较快的速度冷却。铅淬火处理的目的是形成均质的显微组织和细化的珠光体。这种处理一般用于为材料的后续线材拉制做准备。

受控冷却是一种在现代盘条轧机里进行的热处理，其热轧后的冷却速度得到很仔细的控制。其过程能形成均匀一致的性能，并且使氧化皮、晶粒大小和显微组织得到一定程度的控制。

碳素钢盘条

化学成分。碳素钢盘条按下列不同的牌号或成分生产的：

- 低碳钢盘条(最高 $w(C) \leqslant 0.15\%$)
- 中-低碳钢盘条($0.15\% <$ 最高 $w(C) \leqslant 0.23\%$)
- 中-高碳钢盘条($0.23\% <$ 最高 $w(C) \leqslant 0.44\%$)
- 高碳钢盘条(最高 $w(C) > 0.44\%$)

通常，各种牌号钢的硫、磷含量均控制在常用的极限值以内，而碳、锰和硅的含量可根据力学性能的要求进行调整。偶尔也会在钢中加入硫和/或磷，以改善其切削性能。

特性及其商品。制造碳素钢线材的盘条在生产中通过工艺控制和检验流程来保证其致密程度和防止产生各种特定用途所不能允许的表面致命缺陷。适用于碳素钢盘条的特性标记和供货商品如下所列：

- 工业特性盘条。
- 链条特性盘条。
- 细丝特性盘条。
- 冷精轧特性盘条。
- 镦头、冷挤压或冷轧特性盘条。
- 木螺钉特性盘条。
- 无屑螺母特性盘条。
- 重型的镦头、冷挤压或重型无屑螺母特性盘条。
- 焊接特性盘条。
- 中-高碳钢和高碳钢特性盘条。
- 特种特性盘条(如用于乐器钢丝的盘条、阀弹簧钢丝和轮胎帘线钢丝)。

力学性能。在较老的轧机里盘条是热卷的，因此在每一卷盘条内都有相当大的差异，这是因为从盘卷中心到外不同的冷却速度所致。因此热轧后的盘条由于存在着这些性能上的变化，很少以特定的力学性能出售。由不同厂家生产的同一牌号的这些性能也各不相同，其性能取决于轧机的类型和所轧制的钢材来源。

在较新的盘条轧机上配置了控制冷却的装置，以此将盘卷的这种内在差异性降低到最低限度。在这种轧机里，精轧温度、冷却水、冷却风以及传送带的速度全都能保持一种平衡，以使生产的盘条具有所要求的品质级别和显微组织。而这种组织又反过来影响盘

条的力学性能，并使其经过直接拉制而满足绝大部分用途的要求。新型轧机上，造成这种盘卷内差异的根源是输送带上卷环的相互叠压，这些叠压部位比大多数的卷环以更慢的速度冷却。

表2.3-53所示是在一台配置了受控冷却装置的现代轧机上轧制的直径为5.6mm(7/32 in)的低碳钢盘条的典型抗拉强度值。表中所示数值的盘条是在充分的空气冷却下轧制而成的。直径越大的盘条，其抗拉强度值越低，盘条直径从5.6mm(7/32 in)开始，每增加0.4mm(1/64 in)，抗拉强度降低1.9MPa(270ksi)。对于没有经过充分空气冷却或在老式轧机上轧制的盘条，其钢材是热卷而成的，可以预计，类似的分析将表明其抗拉强度比较低。

表2.3-54所示是在一台受控冷却轧机上轧制的直径为5.6mm(7/32 in)的中-高碳钢和高碳钢盘条的典型抗拉强度值。

表2.3-53　直径为5.6mm(7/32 in)的热轧低碳钢盘条的抗拉强度值

钢的牌号	沸腾钢		压盖沸腾钢		铝镇静细晶粒钢		硅镇静粗晶粒钢	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
1005	350	51	—	—	380	55	395	57
1006	360	52	365	53	395	57	405	59
1008	370	54	385	56	405	59	425	62
1010	385	56	400	58	420	61	440	64
1012	405	59	420	61	435	63	455	66
1015	425	62	440	64	450	65	475	69
1017	450	65	455	66	455	66	495	72
1018	—	—	475	69	490	71	525	76
1020	470	68	475	69	485	70	510	74
1022	—	—	—	—	520	75	565	82

注：数据取自受控冷却生产的盘条。

表2.3-54　直径为5.6mm(7/32 in)的热轧中-高碳钢和高碳钢盘条的抗拉强度值

钢的含碳量(质量分数,%)	含锰量(质量分数)					
	0.60%		0.80%		1.00%	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
0.30	641	93	676	98	717	104
0.35	689	100	731	106	793	115
0.40	745	108	779	113	820	119
0.45	793	115	834	121	869	126
0.50	848	123	883	128	931	135
0.55	896	130	938	136	972	141
0.60	951	138	986	143	1020	148
0.65	1000	145	1041	151	1076	156
0.70	1055	153	1089	158	1124	163
0.75	1103	160	1138	165	1179	171
0.80	1151	167	1193	173	1227	178
0.85	1207	175	1241	180	1282	186

注：数据取自受控冷却生产的盘条。

合金钢盘条

合金钢就是指规定最大 w(Mn)超过 1.65%，或规定最大 w(Si)或 w(Cu)超过0.60%的钢，也可指为了获得所要求的性能效果而规定任何其他元素的含量范围或最小含量的钢。合金钢的化学成分范围及其极限值的有关内容可参阅本章第1节。

钢线材

线材可以由前面一节所述的各种碳素钢或合金钢盘条经过冷拉得到。为便于叙述不同牌号的碳素钢线材，将它们分成与应用于碳素钢盘条相同的四种类别。根据其含碳量，分类为：低碳钢线材(最高w(C)为0.15%)、中-低碳钢线材(0.15% < w(C) ≤ 0.23%)、中-高碳钢线材(0.23 < w(C) ≤0.44%)和高碳钢线材(w(C) >0.44%)。将传统的 SAE-AISI 代号的四位数或五位数用于制造线材的碳素钢或合金钢。碳素钢和合金钢线材按其特性适用于冷轧、冷镦粗、冷挤压、冷锻、热锻、冷卷、热处理或渗碳处理等方法生产出的品种繁多的制品。

线材的形状与尺寸

线材的形状。虽然一般认为线材都是圆形的，但是也可根据最终产品的需要提供任何一种截面形状。仅次于常用的圆形截面，用得最多的依次为方形、六角形、八角形、椭圆形、半椭圆形、半圆形、三角形以及扁形。除了这些规则(对称)的形状以外，线材还可以为特种用途制成各种奇特和不规则的形状。

线材的尺寸。普通作为线材产品的圆形截面的极限尺寸，其范围从约 0.13mm(0.005in) ~ 25.4mm (1in)(不含)，作为方形截面，则从零点几的毫米(千分之几英寸)至大约13mm(½in)。所有更大截面的圆形、方形以及六角形和八角形截面的尺寸也就是通常所谓的棒材。

线材的加工工艺

线材拉制。钢丝都是使用成卷的盘条，在将其去除氧化皮之后，利用一种或多种的压缩工艺生产获得所要求的尺寸，用于提高表面粗糙度和尺寸精度的线材拉制是最为普通的冷压缩工艺。即使材料化学成分相似，冷拉也会自然形成与热轧所不相同的力学性能和物理性质。通过改变冷拉减缩量和其他线材轧制工艺(包括热处理)，可以得到多种多样的性能和表面粗糙度。

钢丝的力学性能(如强度、刚性和硬度)不但是由化学成分更是由线材的轧制工艺所决定的，故钢丝的力学性能对化学成分的依赖程度不如钢的其他轧制品。在绝大多数的情况下，钢丝的采购人员所感兴趣的是能否适合其使用，却不在乎其化学成分。

在拉制之前，要用酸洗或机械方法去除材料表面的氧化皮。如果进行酸洗，卷料要用清水冲淋，浸入石灰水悬浮液或其他材料溶液的液槽中，再将表面涂层烘干并使酸洗过程中可能被钢所吸附的氢气排逸出去。

在冷拉的过程中，盘条从一个模具的锥孔或者通过一连串多个模具拉制出来，所用模具的数量取决于最终所要求的直径。开始拉制前，先将盘条的一端削尖，使其插进并穿过模具，再用动力卷轴(拉丝卷筒)夹住，然后拉丝卷筒将材料穿过模具拉制出来，并使拉制成的钢丝绕成卷。

拉丝模(见图2.3-8)通常设计成由一个钢的支撑环里镶嵌着一个硬而耐磨的模孔。模孔是由一种或多种(如钨、钽或钛)碳化物的材料与粘结剂(如钴)混合以后压制成要求的形状，再经过烧结成为硬化了的粗坯，然后再进行镶嵌、精整和抛光。对于某些细钢丝，要用金刚石拉模代替碳化物拉模。

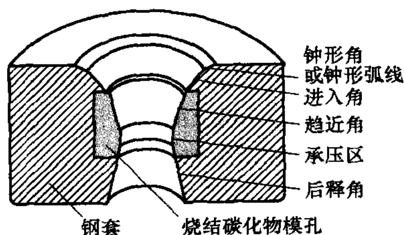


图2.3-8　典型的拉丝模：一个单孔拉丝模的横截面草图(不按比例)，图示为一个烧结的碳化物模孔镶嵌于一个环形的钢套内

拉制过程中的减缩量相对于原来横截面积的百分比称为减面率。一旦盘条通过拉制进行减缩，就称之为线材，即使还有必要经过多次的减缩(拉制)才能减缩到其最终尺寸。

清洁和涂敷。任何时候都有必要通过酸洗及随后的冲洗将钢丝表面的氧化皮与其他污染物清除掉。清洁之后总还要辅之以涂敷工序。

利用石灰、硼砂或磷化物进行涂敷可为后续工艺提供一种必要的润滑剂载体，而润滑剂对于线材的后续工艺是十分必要的。在石灰涂敷中，其操作工艺根据其最终用途给盘条施用不同量的石灰。磷化处理的盘条也可以辅之以石灰、硼砂或水溶皂液的涂敷。

热处理。钢丝的热处理包括退火、铅淬火处理和油回火。

在线退火是低碳钢或中低碳钢钢丝在无润滑的拉制过程中进行的。其产品有时候也叫“经处理钢丝”和“光亮软钢丝”。在生产退火钢丝的过程中，在线退火热处理(并分别继之以清洁和涂敷工序)是在拉丝的中间阶段里进行的，以此生产出一种较软的钢丝，它适用于无法使用直接拉制的钢丝的一些用途上，因为后者的硬度和刚性太高。

铅淬火处理是一种适用于中-高碳素钢和高碳钢的热处理。在这个过程中，使每一股的盘条或线材都能加热到高于上临界温度，然后以较快的速度在空气、熔融盐浴或熔融的铅浴中冷却。一般这种工艺所生产的材料，供后续的线材拉制之用。

油回火是一种用于高碳钢线材的热处理，在过程中已加工到要求尺寸的每一股钢丝被连续地加热到高于临界温度的某一适当温度，然后油淬，最后让其通过回火的浴池。油回火应用于如油回火弹簧钢丝的一些商品的生产上，用这种钢丝制造的弹簧在加工成形后无需进行最终热处理。

特种规格线材

有一些低碳钢与中-低碳钢线材需适用于诸如有特定抗拉强度范围或硬度极限值的一些特殊要求的用途，为此就要涉及钢材的专门选择以及传统轧制工艺和/或热处理(例如在线退火的线材)的改进。这种钢丝通常被定名为特种规格线材。

ASTM A510(表2.3-55)是一个适用于粗制的、碳素钢圆钢丝一般性要求的标准技术规范。特种规格钢丝为了其后续制造工艺，如点焊、电镀和镀锡，可以通过特殊的最终加工工艺得到。

表2.3-55 粗制的、圆截面特种规格钢丝的普通抗拉强度范围

钢丝直径		抗拉强度①	
mm	in	MPa	ksi
0.889 至 <2.69	0.035 <0.106	207	30
2.69 ~ 4.50	0.106 ~ 0.177	172	25
>4.50	>0.177	138	20

①最大值和最小值之间的差值。

金属-镀层钢丝

钢丝可以采用不同的方法进行金属镀层，包括热浸工艺和电镀。

镀铝钢丝(铝镀层钢丝)。其生产方法就是让成卷的钢丝从熔融的铝或铝合金里通过。

镀铜钢丝。其生产方法就是让多股的钢丝从一个装有铜和锌两种盐溶液的电解槽里通过。一般来说，这种钢丝适用于有橡胶粘附性要求或外观很重要的用途上。镀铜钢丝并不适用于需要防腐蚀的用途上。

镀锌钢丝(锌涂层的钢丝)。其生产方法就是让多股的钢丝从熔融的锌浴(热浸镀锌)，或者从装有锌盐的电解槽(锌电镀)里通过。钢丝通常在同一工序中进行退火，即在镀锌之前让其从熔融的铅、熔盐或一个炉子里通过，随即进行清洁和酸洗。ASTM A641 规定了碳素钢钢丝镀锌的一般性要求。

对于钢丝镀锌粒所用的“回火”一词指的是刚性或抗弯性，而非一种热处理。习惯上它分为软、中或硬。相应于这三种回火的抗拉强度如表2.3-56所示。

表2.3-56 镀锌钢丝的抗拉强度及其极限值

钢丝直径		抗拉强度					
		软回火(最大)①		中回火		硬回火	
mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
0.889 ~ 2.03(不含)	0.035 ~ 0.080(不含)	515	75	483 ~ 690	70 ~ 100	620 ~ 825	90 ~ 120
2.03 ~ 2.69(不含)	0.080 ~ 0.106(不含)	515	75	483 ~ 655	70 ~ 95	585 ~ 795	85 ~ 115
2.69 ~ 4.47	0.106 ~ 0.176	483	70	448 ~ 620	65 ~ 90	550 ~ 760	80 ~ 110
>4.47	>0.176	483	70	414 ~ 585	60 ~ 85	515 ~ 720	75 ~ 105

①一般用最大 $w(C)$ 为13%的牌号生产得到。

镀锡钢丝。其生产方法就是将多股的钢丝连续通过熔融的锡浴，在锡浴中出来时经过一个紧紧挤压的辊式挤锡装置。镀锡的钢丝通常按照三种回火方式制造：软、中硬和硬。软镀锡钢丝是在其制造到或接近

最终尺寸时，进行退火之后进行镀锡。中硬镀锡钢丝用经过热处理的钢丝生产得到。而硬镀锡钢丝是用冷拉到最终尺寸的钢丝进行镀锡得到的，通常不需要中间过程的热处理。

特性标记和商品名称

为了应用于机器和设备的各种零件以及特定的最终用途，已经开发出了许多种类的钢丝。其每一种钢丝所具有的独特性能均通过采用不同的钢材的化学成分、钢的特性、热处理规范和冷拉工艺的特定组合而生产得到的。

通常这些钢丝按照用途分成以下几大类：

- 用于一般用途的低碳钢钢丝。
- 用于包装和集装箱的钢丝（包括包装钢丝和捆扎钢丝）。
- 结构用的钢丝（包括镀锌桥梁用钢丝、镀锌和镀铝的拧成股的钢丝以及混凝土加强用钢丝）。
- 用于预应力混凝土的钢丝。
- 用于导电或导热用途的钢丝（包括钢增强铝导线以及电话和电信用钢丝）。
- 绳用钢丝。

紧固件用钢丝

紧固件用的钢丝包括能应用于如螺栓、螺钉、铆钉、木螺钉、自攻螺钉以及无屑螺母的钢丝。根据用途，这种钢丝必须能锻造、挤压、冷镦粗、轧制或切削螺纹、钻孔，以及适当的热处理。

用于紧固件钢丝的钢材种类和牌号取决于其成品的要求及其成形加工所需要的性能。钢的化学成分范围从用于普通种类铆钉的1006号钢至用于锁紧垫圈或螺钉旋具的$w(C)$为0.55%~0.65%的碳素钢。钢丝可以使用热轧或退火的盘条经过拉制而成，在其工艺过程中可以进行退火或球化处理。

必须通过钢丝表面的涂敷为冷镦模提供充分的润滑，而且要有必要的润滑特性，以防止模具发生擦伤或不应有的磨损。虽然石灰皂液涂敷很普通，但磷化涂敷往往应用于有进一步要求的用途上。磷化钢丝的生产就是涂敷经清洁的盘条或用磷化锌处理钢丝，然后再用石灰或硼砂涂敷，使之在后续的拉制过程中包含润滑剂。

钢丝的内部致密性、接缝以及其他表面缺陷的防止产生都很重要。对于那些还要通过热处理进行硬化的产品必须将其脱碳降到最低限度。

一般用途的机械弹簧钢丝

应用于机械弹簧的各种类棒材丝要按不同的化学成分生产，但是其主要依据就是钢丝要具有为满足其用途所必需的特定性能。这种性能要求随弹簧的用途及其在制造过程中所涉及的问题而变化。制约弹簧钢丝选择的因素有：①弹簧必须具有的承载范围；②钢丝的相应应力范围；③重量和空间的限制；④弹簧的期望寿命；⑤使用中存在的温度及其他环境条件；⑥制造中需达到的变形严重程度。

随着钢丝应力的增加，钢丝对强度的要求也更高。由于钢丝表面是弹簧承受应力最高的部分，故消除其表面缺陷也随其最大应力或使用寿命的增加而变得越来越重要。乐器用钢丝的表面状况是非常重要的，甚至比阀用弹簧钢丝更为重要。

一般用途的弹簧钢丝可以分为三大类：硬拉弹簧钢丝（按ASTM A227和A679）、油回火弹簧钢丝（按ASTM A229）和作为热处理元件的弹簧钢丝（ASTM A713）。

乐器弹簧钢丝。一种用于弹簧能承受高应力并要求有很好疲劳性能的钢丝。其最终的拉制通常是用湿白溶液法进行的，以此形成一种带有特征性的平滑光亮的色泽。生产商采用专用的卷绕试验、搓拧试验、扭曲试验以及弯折试验，验证是否符合对于这类钢丝的检验要求。ASTM A228对乐器钢丝提出了详细要求。

细钢丝

凡直径小于0.89mm（0.035in）的钢丝认为是细钢丝，但是作为标称，一些比较粗糙的钢丝的直径可以增大到1.57mm（0.062in）。细钢丝生产中一般都要采用光亮、染红（将钢丝酸洗后浸入硫酸铜和硫酸锡混合溶液中，表面产生的一层铜锡薄膜——译者注）、镀铜或磷化处理，镀锌、镀锡或镀镉，和成为硬拉、退火或油回火的状态。航空钢丝、扫帚、刷子、鱼钩用钢丝、花卉用钢丝、橡胶管加强用钢丝、回形针、昆虫网以及安全销都是全部或部分地利用不同种类细钢丝制成的产品例子。

飞机绳索钢丝。这是一种通过硬拉制成的、高抗拉强度的高碳钢钢丝，是为飞机控制而设计制造的柔性钢绳和多股钢索。

合金钢丝

在前面关于盘条的一节里，已经对合金线材的化学成分、特性描述及其要求、试验和应用进行过阐述。许多合金钢线材的开发都是应用于包括轴承、链条和弹簧的专门用途，以及为了适合冷镦头和冷轧的需求。

合金弹簧钢丝。这是用于制造在中等高温下工作的弹簧。一般使用有三种牌号：6150 铬-钒钢、SAE9260 硅锰钢和 9254 铬-硅钢，它们分别符合 ASTM A231、A232 和 A401 的规定。ASTM A877/A877M 也是针对铬-硅钢的牌号，而 ASTM A878/A878M 适用于经改进的铬-钒钢的阀用弹簧特性钢丝。

这种钢丝一般用以下四种中的一种方法生产：油回火、球化退火、在线退火和在线铅淬火。油回火合金钢丝通常生产到直径为 12.7mm(0.500in)，并要有抗拉强度或硬度的要求，而且用于非常轻度的成形，故一般适用于绕成普通弹簧。表 2.3-57 所示是若干种油回火钢丝的抗拉强度。

表 2.3-57　油回火合金弹簧钢丝的抗拉强度

钢丝直径①		铬-钒弹簧钢丝、航空特性钢丝、阀用弹簧特性钢丝		铬-硅弹簧钢丝	
mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi
0.51	0.020	2070～2240	300～325	—	—
0.89	0.035	2000～2170	290～315	2070～2240	300～325
1.22	0.048	1930～2100	280～305	2030～2200	295～320
1.57	0.062	1830～2000	265～290	2000～2170	290～315
1.83	0.072	1790～1930	260～280	1990～2160	288～313
2.03	0.080	1760～1900	255～275	1960～2140	285～310
2.34	0.092	1720～1860	250～270	1930～2100	280～305
2.68	0.105	1690～1830	245～265	1900～2070	275～300
3.43	0.135	1620～1760	235～255	1860～2030	270～295
4.11	0.162	1550～1690	225～245	1830～2000	265～290
4.88	0.192	1520～1660	220～240	1790～1950	260～283
6.35	0.250	1450～1590	210～230	1720～1900	250～275
7.19	0.283	1410～1550	205～225	1710～1880	248～273
7.94	0.312	1400～1540	203～223	1690～1860	245～270
9.52	0.375	1380～1520	200～220	1660～1830	240～265
11.12	0.438	1340～1480	195～215	1620～1790	235～260
12.70	0.500	1310～1450	190～210	—	—

①对于表中所列以外的直径，其抗拉强度值可以用插值法求得。

第5节　钢管制品

钢管制品的意思涵盖所有中空的钢制品。尽管这些产品通常都呈圆柱形，但它们常在随后以不同的工艺方法加工成方形、椭圆形、矩形及其他对称的形状。这类产品几乎有无数的用途，但是最普通的用途是用作传送流体和结构件。

产品分类

钢管产品的两种最简单和最广泛使用的生产用分类为管材(tube)和管道(pipe)(虽然这两个词的使用并不总是一致的,但是管道一般用于圆柱形的管状产品,而且其外径和壁厚按标准组合制造)。这两大类再细分为若干以用途命名的子类。例如管材包括三类：压力管、结构管件和机械管件。

管道包括如下五类：标准管、管线、油用管件、自来水管和压力管道。还有一些特殊用途的管子，如导管和桩管，它们不属于这些分类。而上述子类的每一种又有许多按用途或以用途命名的分支类。如表 2.3-58 所示。

目前业已开发的产品如表 2.3-58 所示，均以其用途命名而不论其制造方法、尺寸范围、壁厚以及精加工达到的程度。例如从名称上是无法在与标准管道有相同尺寸和壁厚并通常都称之为管道的产品，和有不同基本尺度的管道产品之间进行区分的，而它们都称之为管道。

表2.3-58 管道的主要种类和用途

管道的种类	用途
标准	工业或民用水、油或气的输送管道，分配或进给管，结构用
特种	导管、桩管及其他
管线	油或气的输送管道，总供水管
油用管件	钻管、套管、管材
水文井管	竖管、输水管、套管、扩口管、通风管
压力管	用于高温或高压的管子

从使用的角度看，压力管道和压力管材的区别在于后者适用于外部加热的用途。压力管材的主要用途分组及种类如表2.3-59所示。

表2.3-59 压力管材的主要用途分组及种类

用途分组	种类
水管锅炉	发热管、过热器管、废气预热器管、循环器管、炉壁管
火管锅炉	锅炉烟道、过热器烟道、过热器管、炉顶管、支撑管、安全烟道终点
其他	进水加热管、油蒸馏管

结构和机械管材不属于以上的名称范围。它们的名称取自于制造方法和精加工所达到的程度，如冷成形焊接管或无缝热轧管。

钢管可以用平的制管钢板、带钢或厚钢板成形加工成中空的圆柱形，然后经过焊接形成纵向焊缝；或者在实心的圆柱体中冲孔并将其延伸，以此制成中空的圆柱管。前一类叫做焊接管，后一类称为无缝管。

焊接工艺

在生产焊接钢管产品时，把制管钢板、带钢、薄钢板或厚钢板卷制成圆柱形，然后沿纵向缝线或螺旋形缝线用下述方法之一焊接而成。

电阻焊。包括一系列的工序，首先将平轧的钢板冷卷成形管状。借助由电感应或通过接缝处的电流所产生的热量和施加的压力而生成焊缝。而焊缝压力是由压缩辊子和大焊接电流形成的电磁效应所产生的。具有纵向焊缝的电阻焊管制品的管子尺寸范围从3.2mm(⅛in)的名义外径到0.6m(24in)的实际外径，更大的直径也是可以制造的。电阻焊有时也用于螺旋焊缝的管制品，这种方法往往用于大直径的产品。

连续焊。在连续(或炉内对接)焊的过程中，将边沿为方形或略带坡口的制管钢板放在炉内加热到焊接的温度。当其从炉子里出来时，把加热的毛坯卷制成圆柱形；作为附加热量，通常用氧气或空气喷嘴紧密地对着缝口加热，并且使管子缝口在通过压缩轴辊时，由于辊子的压力而被焊接在一起。连续焊管制品的名义直径从3.2~100mm(⅛~4in)。

熔焊。在熔焊过程中，平轧钢板的边沿经适当的加工后用热或冷的方法卷成管状。平轧钢板可以沿纵向卷(直缝)或螺旋形卷(螺旋形焊缝)。缝口焊接时，可以在熔融或熔融-蒸汽状态下同时堆积金属焊料，也可不用焊料及不要求用机械压力促进焊接。利用电弧或气体加热进行熔化，或两者结合在一起使用。使用熔焊的外径上限取决于成形的方法和所使用的熔焊工艺。

二次埋弧焊。一种特殊的埋弧焊工艺，缝口浸没在固体熔剂中进行焊接。焊接分为两道，一次是从管子的内部进行焊接，另一次是从管子的外部进行焊接，每一次都焊接其壁厚的一半。最大焊接直径仅决定于成形设备的能力，目前二次埋弧焊的管道最大外径可达到3m(120in)。

无缝加工工艺

无缝钢管制品采用旋转冲孔工艺制造直径可以达到0.67m(26in)，用热挤压工艺制造直径可达1.2m(48in)。

旋转冲孔法。在制造过程中，将所需直径和长度的圆钢首先加热到轧制的温度。逐一将圆钢插入一对轴线和表面轮廓交叉的辊子里，并借以拉着它通过辊子，于是使其沿纵向破裂。然后辊子力使金属沿绕着冲点发生流动，扩大轴向孔，使内壁表面光滑，从而形成管子。冲制以后的粗管通常在堵塞轧管机或芯棒轧管机上经热轧达到最终尺寸，接着再在延伸压缩轧机上轧制。

热挤压。这是一种利用热形变加工工艺制造空心管坯的方法，适合于加工规则或不规则形状的成品管材。其过程是将经过加热的并预先冲过孔的钢锭强力压入，并通过由外模和内芯棒组成的有一定形状的模孔。空心管坯的外部尺寸和轮廓由外模得到，而内部的尺寸和形状则由芯棒形成。用冷精加工的方法将挤压后的空心管坯进一步加工成为管制品。

深杯冲和深拉。在用深杯冲和深拉的方法制造无

缝钢管的过程中，在压机上用一系列的锥形模冲制环形的薄钢板或厚钢板，其后一副模比前一副更接近圆柱形，然后再将粗管深拉到最终尺寸。

冷精加工

冷精加工适用于适当尺寸的管道和大部分的管材，而无论其是无缝管还是焊接管。其工艺可用于增加或减小直径，生产除圆外的各种截面形状、表面光滑尺寸公差更小或者提高其力学性能的产品。最常用的工艺就是冷拉，在冷拉过程中，让除过锈皮的热轧管通过模具和穿过芯棒(芯棒拉制)，以此通过塑性变形使其内外表面得到加工。仅仅通过模具(没有芯棒)的冷拉称之为空拔拉制或空拔。

管材的缩径与旋锻。在利用旋转轧管或周期式轧管(皮尔格轧制)对管材进行直径减缩和旋转模锻时，使用一种压缩模让管坯穿越芯棒，然而旋锻不需要使用芯棒。管材的压缩在工业上的重要性是：第一，在轧制长度管子中实现非常大的压缩量(达85%)；第二，该工艺可应用于耐熔合金，这种合金因为要求很大的功率而难以进行冷轧加工。

冷精加工。具有环形横截面的管制品的外径可以通过的车、磨、抛光或这些工艺的组合进行冷精加工。它们也可以通过镗削、刮削和珩磨加工其内孔。因为这些方法都是把毛坯余量去除而几乎没有塑性变形，故无助于力学性能的提高。

包括强度在内的许多标准技术规范都是以热轧或冷轧材料的性能为依据的。有些高强度的油用管件通过热处理获得一些用途所要求的高强度、塑性以及抗硫化物的应力-腐蚀开裂的性能综合。

冷拉可以用于提高表面粗糙度和尺寸精度，并且提高管制品的强度。有些由客户技术规范所规定的强度要求最好能通过冷形变加工来达到。

管道尺寸和技术规范

管道不同于管材的差别在于其尺寸的规格相对较少，故每一种尺寸的产量就相对较高。为了尽可能齐全地列出主要以用途命名的管道的标准尺寸规格及其重量，应当查阅《AISI 钢材产品手册》。对于油用管件，其技术规范归美国石油学会(API)管辖。表2.3-60列出了目前ASTM、API和加拿大标准协会(CSA)有关管道的技术规范，其中一些还包括了若干个牌号。所列的技术规范覆盖了碳素高强度低合金钢(HSLA)和除不锈钢外的合金钢的所有的制造方法以及很宽的使用温度范围。所生产的钢材屈服强度的范围为170～930MPa(25～135ksi)。

表2.3-60 碳素钢、HSLA和合金钢的ASTM、API和CSA技术规范

技术规范	产 品
ASTM技术规范	
A53①	焊接钢管和无缝钢管，发黑和热浸，镀锌
A106①	在高温下使用的无缝碳素钢管
A134①	电弧焊厚钢板管(规格400mm或16in及其以上)
A135①	电阻焊钢管
A139	电弧焊钢管(规格100mm或4in及其以上)
A211	螺旋焊钢管或铁管
A252	焊接和无缝钢管桩
A333①	在低温下使用的焊接钢管和无缝钢管
A335①	在高温下使用无缝铁素体合金钢管
A381	用于高压传送系统的二次埋弧焊钢管
A405	无缝铁素体合金钢管，经特别热处理以供高温下使用
A523	用于高压电缆导管的电阻焊或无缝钢管(光管端)
A524①	用于大气和较低温度的无缝碳素钢管
A587①	用于化学工业的电阻焊低碳钢管
A589	焊接和无缝碳素钢液管
A671①	用于大气和较低温度的电弧焊钢管
A672①	用于高压、中温的电弧焊钢管
A691	用于高压、高温的电弧焊碳素钢或合金钢管
A714	焊接和无缝HSLA钢管
A795	消防用的发黑和热浸、镀锌(电镀)的焊接和无缝钢管
API技术规范	
2B	制造结构钢和管道的技术规范
5CT	套管和管材的技术规范
5D	用于钻管的技术规范
5L	用于管线的技术规范
CSA标准	
CAN3-Z245.1-M86	钢管线

①这些ASTM技术规范也由ASME颁布，不过在“A”前加注“S”(如SA53)。

普通类型管道

下面简要阐述某些较为普通类管道的最终用途。

标准管道。指公称直径大至660mm(26in)(含)的、标准重量的、特强型的、加倍焊接强度的以及具有一般表面粗糙度和尺寸公差的焊接钢管或无缝钢管。这种钢管用于流体传送和一些结构用途。

导管。专门用于制造一些刚性导管的焊接钢管或无缝钢管，适用于保护电缆系统的产品。

桩管。用于桩柱的焊接钢管或无缝钢管，起永久承载作用的圆柱形型材或作为浇注在一起的混凝土桩的套管。

接头管。标准重量的、特强型的、加倍焊接强度的焊接钢管或无缝钢管。应用于制造管接头。

输送管道或管线。外径名义尺寸范围为3mm(⅛in)至1.2m(48in)的焊接钢管或无缝钢管，主要用于输送气体和油品。由API技术规范5L和CSA技术规范Z245.1所规定的输送管道，越来越多地采用屈服强度为550MPa(80ksi)的微量合金HSLA钢制造的。

水管总线。作为市政和工业用的自来水输送管使用的焊接钢管或无缝钢管。如此用途的管线通常定名为水流总线、输送总线、压力总线、水总线或分流总线。总线一般都铺设于地面之下。

油用管件。这是油、气工业上用的一个综合性名词，并在油井里分为三种：钻管、套管和管材。这些产品均符合API技术规范的5CT(套管与管材)和5D(钻管)的规定。

钻管是通过旋转把动力从地面传送到地表下面的钻头，并同时将冲洗介质输送到钻头的切削面上。钻管的外径尺寸范围为60~170mm(2⅜~6⅝in)。其尺寸规定是指其实际外径和每呎(英尺)的重量。钻管通常都要从内部、外部或同时加粗，加工成能与焊接而成的连接头相适应。

套管是用于作为油、气井壁上的结构支撑，防止不需要的流体进入井内，并通过封闭让油或气从地下的生产岩层导出地面。套管生产的外径尺寸范围介于115~500mm(4½~20in)之间。

管材用于油井的套管内，将油或气导出地面，其生产的外径尺寸范围介于26~114mm(1.05~4.50in)之间，并有几种每呎的重量。其端部套有螺纹以供与专用的连接接头或联轴器相连接，其外径可以加粗也可不加粗。

水文井管道。这是用于水文钻井的四种管道的综合性名词，符合ASTM A589的规定：种类Ⅰ，传动钻管；种类Ⅱ，扩口和通风管；种类Ⅲ，从动水井管；种类Ⅳ，套管。

传动钻管是用于将动力从地面送到地表下面的旋转钻头，并将冲洗介质输送到钻头的切削表面上。每一段的管子都在其端部套出专用螺纹，使之同联轴器的内孔相对接。钻管是按名义外径尺寸[150、200、300、350和400mm(6、8、12、14和16in)]生产的。

从动水井管是一种套有螺纹、长度稍短的用于手动钻头或用于短钻架上。其供货长度范围为0.9~1.8m(3~6ft)或1.8~3.0m(6~10ft)，具体长度不作规定。

套管用于作为井壁上的结构支撑，并通过封闭让水导出地面。套管是按螺纹管生产的；其长度范围为4.9~6.7m(16~22ft)，具体长度不作规定；外径尺寸范围介于90~220mm(3½~8⅝20in)之间。按西方的水文井管技术，有时使用焊接管线组件。

扩口管、通风管与套管相似，但是其制造和检验能确保管线组件符合预定最小直径，并且能使泵或其他设备在里面通行无阻。

压力管道。它作为与压力管材所不同的商业名词，用于输送高压、高温或同时高温伴高压流体的管道，但是其管道外不能承受加热。无法用ASTM将其与其他管道进行区分，表2.3-60列出了它与其他管道的应用技术规范。压力管道的尺寸范围为外径从公称3mm(⅛in)到实际660mm(26in)，而壁厚各不相同。

压力管材

对于压力管材，ASTM与生产厂家有不同的分类法。压力管材与压力管道的区别在于，其输送压力流体时可以承受外界加热。表2.3-59中列出了主要压力管材的使用名称。这些管材都是按(定购者所规定的)实际外径和最小或平均壁厚生产的，而且根据规定，最终为热形变加工或冷加工。

双层卷焊管。这是一种仅限于小尺寸的特殊管材(参阅ASTM A254)。它被大量地应用于汽车工业的制动系统和燃料系统的管路，以及制冷工业的制冷管路。它利用单层带钢或双层带钢的结构将镀铜的带钢成形加工成为具有两层壁厚的管材，然后再让管子在还原气氛下加热，使全部相接表面得到完整的连接。于是得到的产品里外都是经过镀铜的。当用途需要，也可用镀锡。其外径尺寸范围为3~15mm(⅛~⅝in)，而管壁厚度则从外径3mm(⅛in)时的0.64mm(0.025in)到外径15mm(⅝in)时的0.9mm(0.035in)。

结构管材

结构管材用于桥梁和建筑物上经焊接、铆接或螺

栓连接的结构或一般的结构用途。它可以是圆形的、方形的、矩形的或特种形状的管材。这些产品都有 ASTM 的技术规范。

机械管材

机械管材包括应用于各种不同机械用途上的焊接管和无缝管。其生产通常要满足最终的使用要求，故生产成许多的形状，以及不同的化学成分和力学性能，及其冷、热形变加工的表面。大部分的机械管材都是按照 ASTM 技术规范订货的。即使使用客户的技术指标，通常也要参照部分 ASTM 标准。

机械管材是不按规定的标准尺寸生产的，而是按客户要求用指定生产设备或工艺所生产的特殊规格。

焊接机械管材通常用电阻焊，也有的用不同的熔焊工艺制造。但不管用何种工艺（如必要），都要通过切削、磨削或锤打将上面的焊疤除去。

电阻焊（ERW）机械管材是用热轧或冷轧的碳素钢或合金带钢生产的。焊接管材可以焊接的、热或冷的精轧形式供货。由 ERW 所生产的规格范围为外径从 6.4～400mm（0.25～16in），壁厚热轧钢的从 1.65～17mm（0.065～0.680in）、而冷轧钢的从 0.65～4.2mm（0.025～0.165in）。

连续焊接冷精轧机械管材。顾名思义就是一种经过炉内对接焊的热成形和冷精轧得到的管材。它是通过空拔或心轴拉制得到的，其外径可达 90mm（3½in），而厚度从 0.9～13mm（0.035～0.5in）。材料为低碳钢，得到的产品形式实际上是冷拉管。虽然得到的产品尺寸范围比电阻焊管材的小，但它还是有两大优点：①在其尺寸范围以内，可以制成较厚的管壁；②没有产生焊瘤的问题。

无缝机械管材。无论热、冷加工都能得到广为不同的表面粗糙度和力学性能。由碳素钢和合金钢制成的产品，其尺寸可达到外径 325mm（12¾in）。

第6节 闭式模用钢的锻件

锻造是一种在模具间的热金属加工，通常都是在连续的打击下或有时为持续挤压。闭式模的锻件、热镦零件和挤压件都是在由闭式模所形成的空腔内成形的。

选用锻造相对于其他方法更有其优势，有时根据多方面的考虑，这也是一种生产适用成形零件的较为经济的方法。在加工过程中，锻压材料的力学性能在沿其金属流动的主方向上得到最大的提升。

锻件的种类

锻件有几种分类方法，一般的分类都是从“开式模”和“闭式模”开始的。它们也按照“接近成品”的原则或毛坯裕量（外覆）进行分类，而这个毛坯裕量是必须通过切削从锻件上去除，才能满足成品零件尺寸和各种细节的要求（见图 2.3-9）。最后，锻件可以按照其制造所用的设备进行分类：如自由锻锻件、环轧制锻件和多工位压力机锻件（该设备详见本手册（下册）第4篇第4章有关内容）。

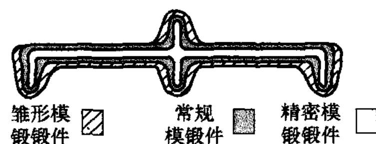


图 2.3-9 锥形模锻式锻造、常规模锻和精密模锻的锻件的横截面组合草图

在这些不同的方法中，以接近成品为基本特点的方法与锻件所固有的性能如强度和抗应力-腐蚀开裂之间的关系最为密切。一般来说，要求能以最少切削加工来满足其成品零件要求的锻件才会有最好的性能。为此，作为一个由粗锻锻件切削加工得到的成品零件，其力学性能和耐腐蚀性往往都不如用公差小且没有拔模斜度的锻件加工所得的零件。

钢的选择

为锻造零件选择钢种是设计过程中的一个组成部分，它所具有的合格性能将取决于这个选择。对成品零件的最终应用有一个透彻的了解，将有助于确定它所需求的力学性能、非金属夹杂物的允许含量以及相应的检验方法和检验极限值。

电炉、平炉或转炉炼钢工艺能按照很大的化学成分范围生产锻件特性钢。

可锻性。描述钢在压缩载荷的作用下不发生断裂而能流动的相对能力。除了加硫和加磷的牌号钢以外，大部分的碳素钢和低合金钢通常都可认为有很好的可锻性。不同牌号钢之间的锻造特性差别很小，所以在选用钢的时候很少会考虑锻造特性的影响。往往只有当锻件必须要进行较多的切削加工时，才会选择加硫或加磷钢作为锻件使用，因为考虑采用锻造进行制造的一个主要理由就是为了避免后续的切削加工工序，因此这种选择的情况并不多见。

设计要求。为锻造零件选用钢材常需要在一些相反的因素之间进行取舍，例如强度对韧性、抗应力-腐蚀开裂对重量、制造成本对有用承载能力以及生产成本对维修成本和钢的成本。

材料的选择还要包括对冶炼工艺、成形方法、切削加工工序、热处理规范、在使用过程中其性能随着

时间的流逝而退化以及锻造钢的常规力学和化学性能等问题的考虑。

一种有效的锻件设计就是要满足其作用载荷、生产率和要求的预期寿命，以最少的材料获取最高的效能。为了使钢材与其设计零件相匹配，首先要评估其强度和韧性，继而是它对于温度和环境的稳定性。然后还要对钢材的生产率和最终经济性进行优化分析。

成本。钢的成本在锻件的总的制造成本中所占的百分比如图2.3-10所示。这些曲线是根据许多实际锻件的平均值得出的，它们的锻造次数和要求的热处理工艺、钢的成本、数量和镦粗成本都各不相同。从这些数据中不能推理出14kg(30lb)重的不锈钢零件的成本比同样重量的平均碳素钢锻件高出34%。

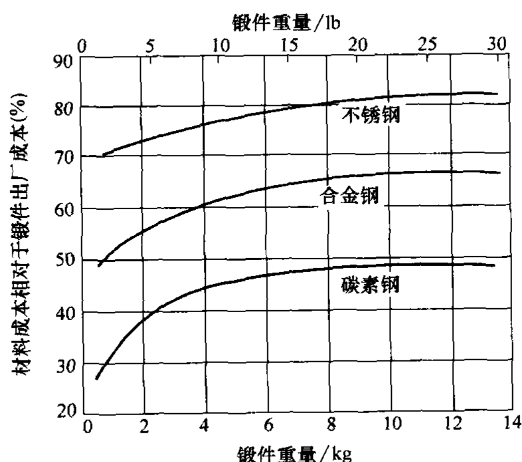


图2.3-10 钢材成本在锻件总成本中所占的百分比

材料控制

在完成锻件的设计之后的任务就是保证和验证最后提交的锻件在所有的性能和特征方面都符合锻件的图样规定。

材料控制的职责就是采购方与供应商之间的协议规定。在许多这样的协议中采购方负责设计、材料的选用以及制造过程中的控制，而锻件供应商负责进行原材料的检验和保持适当的工艺控制及产品的检验。

试验与试件。由材料技术规范所规定的试验应提供该试验与材料在实际应用中特性的相关性及其诠释。全尺寸结构零件的动力性能几乎很难根据小试件在简单的室温条件下的试验进行预估。结合模型或全尺寸试验的分析研究，能够利用简单试验的放大而对材料复杂性能作出解释。

为确保材料特性而需规定的试件类型及其试验，取决于最后零件工作时的工况条件。例如当一个重要的锻件要承受很大的拉伸载荷时，设计人员就要为其设定一个能测试断裂韧度和抗拉强度、屈服强度的试验。对于高温的工况条件应当设计能在相应温度下测试材料强度、塑性和蠕变性的试验。

试验计划。因为全尺寸试验往往为其所花的成本和时间所不允许，故技术规范常常是根据实验室的试件试验结果制订的。表2.3-61所示是为评估飞机上用的两种高强度9Ni-4Co钢的力学性能所进行的试验，其试验温度从-45~205℃以上(50~400℉以上)。该表所示也是一种非常独特的评估所要求的试验范围和次数。

如表2.3-61所示，作为力学性能的试验包括拉伸、压缩、剪切和轴承强度的试验，还可按要求通过对有代表性的试件进行纵向、宽度方向和高度方向的方向进行试验，以此对晶粒方向的影响做出评估。除了室温试验之外，还可以在-80℃、150℃和260℃(-110℉、300℉和500℉)的温度下试验。该计划包含总共285个个案试验。

表2.3-61 确定锻件材料力学性能的试验计划

温度与试验	试验次数①							
	9Ni-4Co-0.30C钢(1520~1660 MPa或220~240ksi)②				9Ni-4Co-0.45C钢(1790~1930 MPa或260~280ksi)③			
	L	LT	ST	小计	L	LT	ST	小计
在-80℃(-110℉)								
拉伸	2	3	2	7	2	4	2	8
压缩	1	3	1	5	1	4	—	5
剪切	1	3	1	5	1	3	1	5
轴承 $e/D=1.5$④	1	2	1	4	1	1	1	3
轴承 $e/D=2.0$④	1	2	1	4	1	4	1	6

（续）

温度与试验	试验次数①							
	9Ni-4Co-0.30C钢(1520～1660 MPa或220～240ksi)②				9Ni-4Co-0.45C钢(1790～1930 MPa或260～280ksi)③			
	L	LT	ST	小计	L	LT	ST	小计
室温								
拉伸	12	12	12	36	18	17	18	53
压缩	3	3	3	9	2	4	3	9
剪切	3	3	3	9	3	4	2	9
轴承 $e/D=1.5$④	3	3	3	9	3	3	3	9
轴承 $e/D=2.0$④	3	3	3	9	3	3	3	9
弹性模量	1	1	—	2	1	1	—	2
在150℃(300℉)								
拉伸	1	3	1	5	2	4	2	8
压缩	1	1	1	3	1	4	—	5
剪切	1	1	1	3	1	3	1	5
轴承 $e/D=1.5$④	1	1	1	3	1	2	1	4
轴承 $e/D=2.0$④	—	—	—	0	1	4	1	6
在260℃(500℉)								
拉伸	2	3	2	7	—	—	—	0
压缩	1	3	1	5	—	—	—	0
剪切	1	3	1	5	—	—	—	0
轴承 $e/D=1.5$④	1	2	1	4	—	—	—	0
轴承 $e/D=2.0$④	2	2	1	5	—	—	—	0
试验数合计	42	57	40	139	42	65	39	146

①L，纵向；LT，宽度方向；ST，高度方向。　②三炉次。　③四炉次。　④D为孔直径；e为沿作用应力方向从孔中心至材料的边沿的边距。

塑性和锻造压缩量。材料控制的主要目的是保证加工后的锻件得到最佳力学性能。在锻造中获得的压缩量对于伸长率有明显的作用，图2.3-11所示是分别在铸锭、锻造（轧制）棒材或钢坯及锻件中两者之间的比较。图2.3-11a的曲线表明，当锻造棒材或钢坯在一个模具里锻成扁平时，锻件压缩量的增加不会影响纵向伸长率，但是确实会造成横向伸长率的逐渐提高。当类似的棒材或钢坯在一个模具里镦粗时，锻件压缩量的增加会造成轴向伸长率的逐渐降低和径向的逐渐增加。

晶粒流线。通过宏观浸蚀可以观察到晶粒的方向和轮廓，还可用以探测出褶皱、叠压和凹陷流。通过对适当的试件进行宏观浸蚀，可以沿纵向、宽度方向和高度方向检查晶粒流线。宏观浸蚀还能对全部断面、端面到端面以及侧面到侧面进行评估，并检查宏观晶粒大小的均匀性。图2.3-12所示是一个典型锻造零件的晶粒流线。

端晶暴露。在宽度方向和高度方向方向上是否具有抗应力-腐蚀开裂的能力是与端晶暴露有关的。截取一根长而窄的试件，使其晶粒平行于试件的纵轴方向，这样除了在长端以外都不会有暴露的端晶，而其端面并不承受载荷。与之对照的是将相应的试件沿横向切断，则其沿长度方向的晶端全部都暴露出来。模锻件设计有飞边接缝的，在其高度方向的晶端特别明显。因此设计锻件要尽量减少或避免端晶，这样才能更好地防止应力-腐蚀开裂的发生。

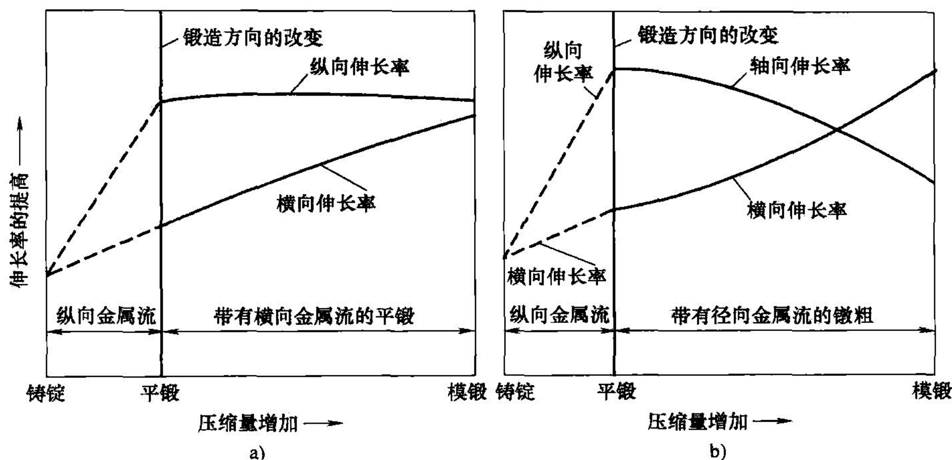


图 2.3-11 锻件中的金属流。在锻造过程中金属流的程度和方向对伸长率的影响

a）在平锻棒材中的纵向和横向伸长率 b）在镦粗棒材中的轴向和径向伸长率

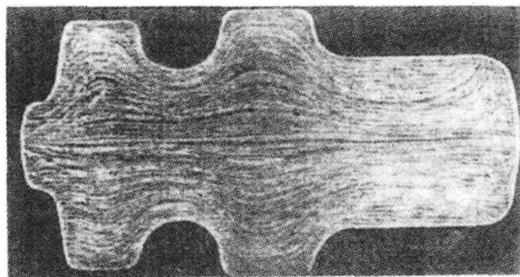


图 2.3-12 AISI 合金钢的闭式模锻件中的流线

力学性能

利用轧制、锻造和挤压方法成形的金属零件的主要优点在于，这些工艺为设计者提供一个控制晶粒流线的机会。经上述或类似方法锻造的产品沿其晶粒流线的纵向(或与之相当)方向几乎总能达到最高强度；通过沿其工作时所作用的主载荷方向形成一种与之平行的晶粒流线形式，以此使成品零件得到最大承载能力；此外在整体上形成一种无缺陷的、致密的和晶粒得到充分细化的高质量金属。

晶粒流线和各向异性。经过轧制、锻造和挤压的金属形成并保持一种类似纤维状的沿着主变形加工方向的晶粒结构。当锻造产品的表面经过适当的制备和腐蚀，就能从外观及其截面上看得到这种特征。所谓的“纤维”就是金属显微组织的组分沿着加工方向延伸的结果。因此“晶粒流线的方向”一词通常说的就是经过锻造金属内部的这类明显的纤维方向。

在经锻压的金属里，晶粒流线的方向也可通过力学性能的测试得到证实。平行于变形加工方向的强度和塑性几乎总是比较大。这种相对于加工方向的不同方位上所表现的不同强度和塑性数值的性质称之为“力学各向异性”，并且在锻压产品的设计中得到开发利用。

虽然锻造金属中的最佳性能往往都是沿其(或相当于)纵向的，但是在其他方向上的性能还是优于那些未经锻造产品的性能，例如铸锭或一些用钢锭只经过轻微锻造而成的锻件毛坯。

图 2.3-13a 所示为方形轧制截面的示意图，其剖视图表示的是相应于试棒平均力学性能的各向异性。纵向试棒 1 的平均力学性能要优于横向试棒 2、3 的平均力学性能。试棒 2 和 3 的力学性能是相等的，因为截面是正方形的，则意味着截面上的在这两个横向方向上的压缩量也是相等的。

各向异性的力学性能也存在于图 2.3-13b 所示的矩形截面上、图 2.3-13c 所示的圆柱体中和图 2.3-13d 所示的轧制圆环中。还有，最佳平均强度性能都位于纵向的试棒 1 上。如图 2.3-13a、b 所示的矩形截面，随着截面被轧扁，其试棒 4 的“宽度方向”性能比试棒 5 的“高度方向”的有所增强。于是，这样的矩形截面在其所有三个主方向即纵向、宽度方向和高度方向表现出各向异性。利用如图 2.3-13b 所示的矩形截面的设计包含了其所有方向上的性能，而不仅仅是纵向的。因此矩形截面上的纵向方向、宽度方向和高度方向上的作用载荷要分别进行分析。同样的道理可应用于圆柱体，无论是挤压还是轧制；如图 2.3-13c、d 所示，其纵向的方向根据所使用的锻造工艺而改变。

锤锻和压锻的基础

许多小锻件都是在模具里压制的，模具里有一系

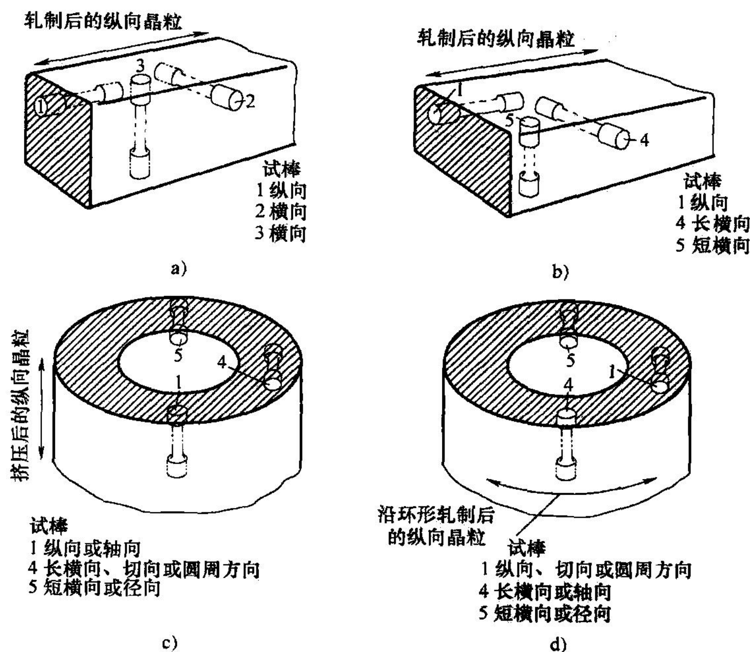


图 2.3-13　锻件的各向异性及其力学性能。以几个分图说明截面形状、锻造工艺或两者同时对于锻件的纵向方向的影响

a）方形轧制毛坯　b）矩形轧制毛坯　c）圆柱体的挤压截面　d）环形轧制截面

列的凹腔让毛坯逐步进行预成形，并在最终的凹腔里达到最后(或"成品"的)的形状。大型锻件的模具通常都是一次一个工序。上半模的凹腔更深、更复杂一些，用销子或燕尾槽固定在锻锤或冲床的滑块上。而下半部分用销子固定在锻锤或冲床的底座或床身上，并且与上模精确对准。锻件毛坯加热后一次又一次地置于凹腔上，如此逐次地锻造成最后的形状。

分型线。这是一个沿锻件一周的面，上、下模的撞击面在其位置上碰到一起。通常模具位于其分型线的外面有一排料槽或出口槽，当上、下模合拢成最后的空腔时，它可以容纳过量外流的金属或被挤压出来的飞边(见图 2.3-14)。在较为复杂的锻件上面，围绕其上面的孔和其他轮廓会有一些其他分型线，它们像外分型线那样可以处在同一平面上，也可以不在。

从最经济的角度考虑，外分型线应该处于单一平面上。当分型线一定要沿一个轮廓布置时，不论是台阶式或镶嵌式的模具都必须使轴向压力均匀化，如图 2.3-15 所示。这会因此增加多于 20% 的成本，因为不仅模具本身的成本提高，而且锻造难度和时间也都要增加。陡峭或直落的分型线与垂直线的夹角对小零件来说限制在大约 15°，而对大零件则为 25°，以此防止修整飞边时本应是切断的而变成撕裂。有时可以将分型线如图 2.3-16 下面部分所示的那样进行布置，

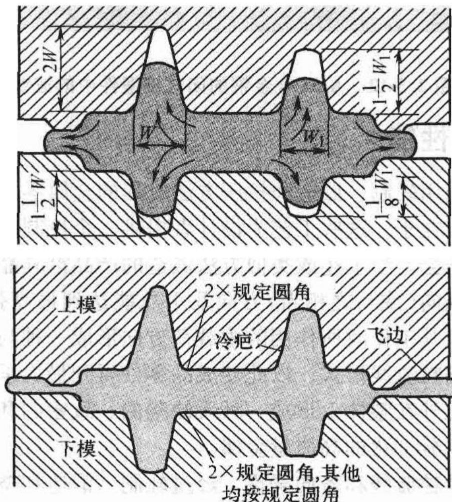


图 2.3-14　锻造过程中金属流动的两个阶段。上图所示的是对于分型线上、下筋的高度限制

以此避免使用扣合模。

不同的工厂生产锻件时，在锻件上可选择的分型线的技术要求也因厂而异。除非都不要拔模斜度，否则这种差别会在后续的切削加工中如要用卡盘夹持时给锻件的定位造成困难。然而如果修整角度各不相同，那么并不总是有适当的方法将拔模斜度剪切掉。

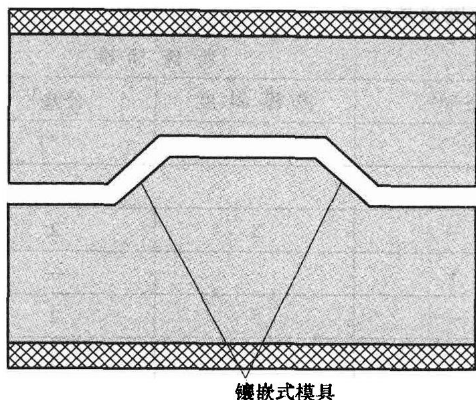


图 2.3-15　用于均匀化轴向压力的镶嵌或台阶式模具

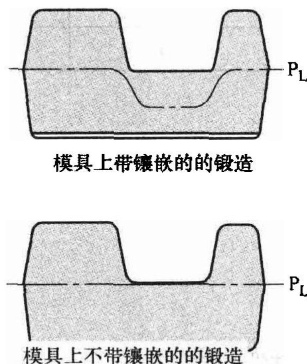


图 2.3-16　为防止反向镶嵌和消除拔模斜度，锻件在模具中的方向

若分型线有一个确定的规定，则在不同的工厂里生产的锻件质量更一致，且形状的差异也更少。

拔模斜度。锻件侧面的拔模斜度就是为能使锻件在模具中有所松动而必须有的角度或斜度，同时也是为了延长模具的寿命和生产的经济性。拔模斜度的要求是随锻件的形状和大小而变化的。零件的大小对金属所需求的拔模量的影响可由图 2.3-17 得到说明。

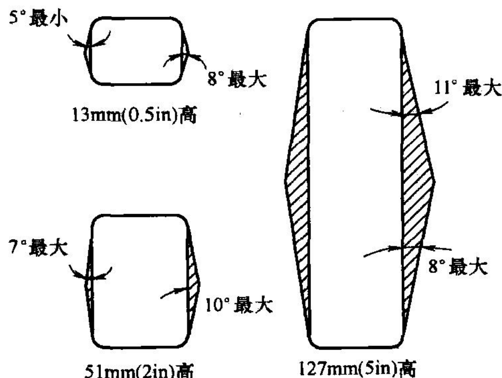


图 2.3-17　零件的大小对锻件所需求的拔模量的影响

内拔模斜度是一种当锻件冷却收缩时，其所在的表面会夹紧在模具上的拔模斜度，如像窄槽或凹穴一样的空腔。外拔模斜度是一种当冷却时，其所在的表面如筋或凸台会因收缩而脱离模具的拔模斜度。这两种情况可以用图 2.3-18 说明，可见内拔模斜度要比外拔模斜度大一些(一般性的关系)。表 2.3-62 所示为钢锻件拔模角度的推荐值。

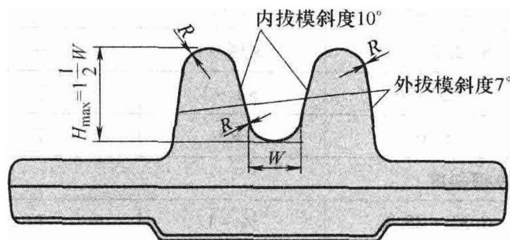


图 2.3-18　内、外拔模斜度的定义和介于两个筋之间的凹槽的深度极限值

公差

表 2.3-63 和表 2.3-64 所列的锻件的公差是依据锻件的面积和重量所制定的很实用的工艺参数。这些公差所使用的尺寸列于如表 2.3-63 所附的说明中。在利用这些表格确定锻件的尺寸时，应该在锻件的切削裕量加上切削后尺寸的基础上再增加如模具错位、模具磨损和长度的相关公差。作为平均值，表 2.3-63 和表 2.3-64 所列的公差符合实际生产零件的全部工艺公差，而且表中所列的尺寸具有 99% 以上的可接受性。特别是表 2.3-64 所推荐的公差可适用于一些高精度的情况里，其误差也很少会高达 ±50%。

模具的磨损特征如图 2.3-19 中曲线所示。其代表的零件是用 4140 钢制成的，在 11kN(2500lbf) 的重力锤上打击十次而成。公差都是生产用标准，然后零件厚度按公差 +0.25mm，−0.000 (即 +0.010in，−0.000)进行压制。250mm×450mm×455mm(10in×18in×18in)的模板淬硬到 42HRC。模具生产 30000 件的锻件后形成如图 2.3-19 所示的磨损，需要重新刻模具。

表 2.3-64 给出了模具错位的公差范围。对于在锻造过程中，需要使用扣合模或包含侧压力的锻件，其公差值应取大一些。对于超过 23kg(50lb)的锻件，有时有必要磨去因模具错位量高达 3.18mm(⅛in)。

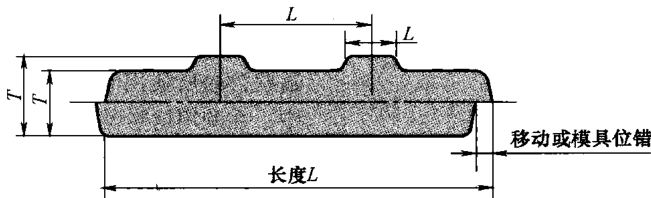
飞边。在冲床上用切边模将飞边切除，模具从水平视图、外形和侧视图上看，都形似分型线的轮廓。将锻件沿其周边分型线所留下的一定量的毛刺或飞边修整切除。

表 2.3-62　钢锻件的拔模斜度及其公差

拔模斜度的深度或高度		生产用标准		特殊标准	
		拔模斜度	公差①	拔模斜度	公差①
mm	in	(°)	(°)	(°)	(°)
外拔模斜度					
6.35~12.7	¼~½	—	—	3	2
19~25	¾~1	5	3	—	—
>12.75~25	>½~1	—	—	5	2
>25~76	>1~3	7	3	5	3
>76	>3	7	4	7	3
内拔模斜度					
6.35~25.4	¼-1	7	3	5	3
>25.4	>1	10	3	10	3

①负公差为零。

表 2.3-63　长度和位置公差的推荐值



锻件的最大长度		长度或位置公差	
mm	in	mm	in
150	6	+1.19, -0.79	+0.047, -0.031
380	15	+1.57, -1.19	+0.062, -0.047
610	24	+3.18, -1.57	+0.125, -0.062
910	36	+3.18, -1.57	+0.125, -0.062
1220	48	+3.18, -3.18	+0.125, -0.125
1520	60	+4.75, -3.18	+0.187, -0.125
1830	72	+5.56, -3.18	+0.219, -0.125

表 2.3-64　钢锻件生产用公差的推荐值

锻件尺寸				公差							
				厚度①				模具位错①(+)		模具磨损 (+)	
面积		重量		+		-					
$\times10^3mm^2$	in^2	kg	lb	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
3.2	5.0	0.45	1	0.79	0.031	0.41	0.016	0.41~0.79	0.016~0.031	0.79	0.031
4.5	7.0	3.2	7	1.57	0.062	0.79	0.031	0.41~0.79	0.016~0.031	1.57	0.062

（续）

锻件尺寸				公　差							
				厚度①				模具位错①（+）		模具磨损　（+）	
面　积		重　量		+		−					
$\times10^3mm^2$	in^2	kg	lb	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
6.5	10.0	0.7	1.5	0.79	0.031	0.79	0.031	0.41 ~0.79	0.016 ~0.031	0.79	0.031
7.7	12.0	5.5	12	1.57	0.062	0.79	0.031	0.41 ~0.79	0.016 ~0.031	1.57	0.062
12.9	20.0	0.9	2	1.57	0.062	0.79	0.031	0.41 ~0.79	0.016 ~0.031	1.57	0.062
12.9	20.0	14	30	1.57	0.062	0.79	0.031	0.51 ~1.02	0.020 ~0.040	1.57	0.062
24.5	38.0	2	4.5	1.57	0.62	0.79	0.031	0.41 ~0.79	0.016 ~0.031	1.57	0.062
24.5	38.0	36	80	1.57	0.62	0.79	0.031	0.64 ~1.27	0.025 ~0.050	1.57	0.062
32.3	50.0	3	8	1.57	0.062	0.79	0.031	0.51 ~1.02	0.020 ~0.040	1.57	0.062
32.3	50.0	27	60	1.57	0.062	0.79	0.031	0.51 ~1.02	0.020 ~0.040	1.57	0.062
32.3	50.0	45	100	1.57	0.062	0.79	0.031	0.64 ~1.27	0.025 ~0.050	1.57	0.062
61.3	95.0	5	11	1.57	0.062	0.079	0.031	0.51 ~1.02	0.020 ~0.040	1.57	0.062
85.2	132.0	8	17	1.57	0.062	0.79	0.031	0.64 ~1.27	0.025 ~0.050	1.57	0.062
107	166.0	33	73	2.39	0.094	0.79	0.031	0.76 ~1.52	0.030 ~0.060	2.39	0.094
113	175.0	68	150	2.39	0.094	0.79	0.031	0.76 ~1.52	0.030 ~0.060	2.39	0.094
130	201.0	18	40	1.57	0.062	0.79	0.031	0.64 ~1.27	0.025 ~0.050	1.57	0.062
155	240.0	23	51.5	2.39	0.094	0.79	0.031	0.76 ~1.52	0.030 ~0.060	2.39	0.094
161	250.0	114	250	2.39	0.094	0.79	0.031	0.76 ~1.52	0.030 ~0.060	2.39	0.094
171	265.0	27	60	2.39	0.094	0.79	0.031	0.76 ~1.52	0.030 ~0.060	2.39	0.094
177	275.0	30	65	3.18	0.125	0.79	0.031	1.19 ~2.39	0.047 ~0.094	3.18	0.125
194	300.0	34	75	3.18	0.125	1.57	0.062	1.19 ~2.39	0.047 ~0.094	3.18	0.125
194	300.0	159	350	2.39	0.094	0.79	0.031	0.76 ~1.52	0.030 ~0.060	2.39	0.094
242	375.0	205	450	3.18	0.125	0.79	0.031	1.19 ~2.39	0.047 ~0.094	3.18	0.125
268	415.0	139	306	3.18	0.125	1.57	0.062	1.19 ~2.39	0.047 ~0.094	3.18	0.125
339	525.0	340	750	3.18	0.125	1.57	0.062	1.19 ~2.39	0.047 ~0.094	3.18	0.125
580	900.0	455	1000	3.18	0.125	1.57	0.062	1.19 ~2.39	0.047 ~0.094	3.18	0.125

①表2.3-63图中所示的模具厚度和位错的位置。

图2.3-19　淬火硬度为42HRC模块的磨损程度。在11kN(2500lbf)的锻锤上以每工件打击10次的速度生产30000件4140钢锻件之后，从模块上测得的模具磨损

热镦粗锻件的设计

热镦头、镦粗或更广义上的机锻主要工艺步骤包括：首先将通常为圆形截面并均匀一致的棒料用槽形模夹紧，然后用一种镦头用工装沿其轴向对头部施加压力，使其头部在模具的型腔内镦粗或变大。通常形成的形状包括端部不同程度的变大，或头部和“凹角”外形轮廓的多次变大。传动多联齿轮、小齿轮、壳体以及许多其他形状的零件都能适用于镦粗的机锻工艺。这种工艺的一大优点是为齿轮的轮齿形成“环形”晶粒流线。简单的镦头锻件可以一步完成，而一些大的头部成形或需多次镦粗的要经过多达六步才能完成。生产的镦粗锻件重量范围从小于0.45kg(1lb)到大约225kg(500lb)。

毛坯的加工裕量。虽然根据零件的镦粗大小、材料和形状，加工裕量介于1.58～3.18mm(0.062～0.125in)之间，但是锻件任何镦粗部分的标准毛坯加工裕量为2.39mm(0.094in)(见图2.3-20a)。

模具的位错和移位每次限于最大0.406mm(0.016in)。错位就是夹紧模具之间的相对位置。

夹紧模中，要求有分型线间隙作为其切向间隙，这是为了锻件从模具中取出得容易一些，并以免发生底切(见图2.3-20a)。

剪断端并没有规定公差。图2.3-20b所示是头部直径为31.8mm(1¼in)的剪断端。直端也可以用气割、锯弓或砂轮切割方法进行切断，但成本都比剪断高一些。

阴角圆弧半径应当由成品零件的轮廓决定，但最小为1.59mm(1/16in)。镦粗面外径上的阳角半径没有要求，但可根据需要作规定。不同的镦粗厚度要求有不同的半径，如图2.3-20c所示，因为力的作用源在较远处撤除，并且其模具的空腔难以填满。对于很长的镦粗，它只能镦至比原来的直径尺寸稍稍大一点，故建议用锥形代替圆角。

公差。所有镦粗直径的公差一般都为+1.59mm、-0(+1/16in、-0)，除非其法兰的截面较薄和对于所用的毛坯尺寸有相对大的镦粗比例，此时公差可达+2.38mm、-0(+3/32 in、-0)。由于热轧棒料尺寸的变化、模具严重磨损和零件的复杂，有时需要使标准公差大于+1.59mm、-0。

根据锻件的设计特征，其拔模斜度可以在1°～7°间选用。锻件从剖分模中松动需要有拔模斜度，当锻件从一个模腔移至另一个模腔时，还可以借此减少在其表面的剪切力。

对于要求多道工序或需多次镦轧的镦锻零件，应根据单独每一工序或镦轧的设计确定所需要的长度尺寸。

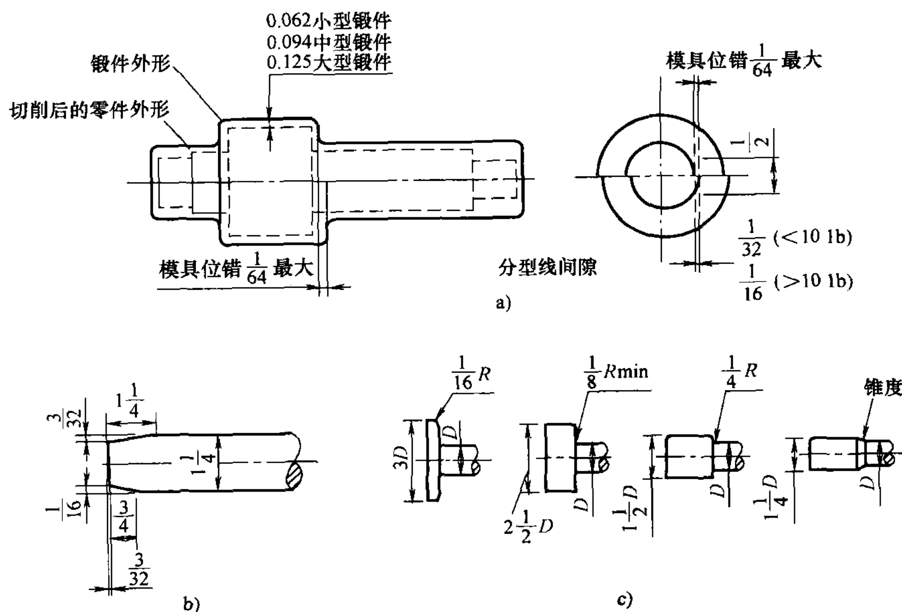


图2.3-20　热轧锻件的切削加工裕量。图示这些零件都是镦粗零件中最为简单的形状。图中尺寸为in

a）热镦粗的名词术语和标准　b）剪断端的可能形状　c）圆角半径随镦粗厚度而变化

第7节 铸 钢 件

许多种类的碳素钢和合金钢都可以用来生产锻造型的铸钢件。这种铸件将所要求成分的钢液倒入具有一定形状的模型里让其凝固。模型的材料可以是硅土、锆土、亚铬酸盐或橄榄砂、石墨、金属或陶瓷。模型材料的选用取决于铸件的尺寸、复杂度和尺寸精度以及成本。而生产的铸件尺寸及其精度随模型的类型有很大的变化，但对铸钢的性能不会有明显的影响。无论以哪一种模型生产得到的铸钢件和成分相当的锻造钢并经过同样与之相适应的热处理后都有同样的焊接性，以及相似的物理、力学和耐腐蚀性能。铸钢不会对代表锻造钢的力学性能表现出确定性的影响。

按照碳和合金的含量，本节所讨论的铸钢件分为四大类。碳素钢铸件分为三类：w(C)低于0.20%的低碳钢铸件、w(C)为0.20%~0.50%的中碳钢铸件以及w(C)超过0.50%的高碳钢铸件。第四类就是合金铸钢件，一般限于金属合金含量低于8%（质量分数）的牌号钢。

技术规范

铸钢件在采购时，通常以严格的化学成分来满足其规定的力学性能。表2.3-65和表2.3-66所示是在ASTM的各种技术规范和SAE J435c中所规定的要求。表2.3-65中所列主要为碳素钢铸件（及某些比较低的合金钢种类），而表2.3-66则为一些低合金钢铸件以及某些w(Cr)高达10.0%的铸钢。

表2.3-65 不同碳素钢铸件的技术规范要求一览表

等级或牌号	抗拉强度①		屈服强度①		50mm(2in)长的最小伸长率(%)	最小断面收缩率(%)	化学成分②(质量分数,%)			其他要求	条件和特定应用
	MPa	ksi	MPa	ksi			C	Mn	Si		
ASTM A27：用于一般用途的碳素钢铸件											
N-1	—	—	—	—	—	—	0.25③	0.75③	0.80	0.06%S，0.05%P	仅化学分析
N-2	—	—	—	—	—	—	0.35③	0.60③	0.80	0.06%S，0.05%P	进行热处理，但不进行力学性能试验
U60-30	415	60	205	30	22	30	0.25③	0.75③	0.80	0.06%S，0.05%P	进行力学性能试验，但不进行热处理
60-30	415	60	205	30	24	35	0.30③	0.60③	0.80	0.06%S，0.05%P	进行热处理和力学性能试验
65-35	450	65	240	35	24	35	0.30③	0.70③	0.80	0.06%S，0.05%P	进行热处理和力学性能试验
70-36	485	70	250	36	22	30	0.35③	0.70③	0.80	0.06%S，0.05%P	进行热处理和力学性能试验
70-40	485	70	275	40	22	30	0.25③	1.20③	0.80	0.06%S，0.05%P	进行热处理和力学性能试验
ASTM A148：结构用途的碳素钢铸件④											
80-40	550	80	275	40	18	30	⑤	⑤	⑤	0.06%S，0.05%P	为规定力学性能所必要的成分分析和热处理
80-50	550	80	345	50	22	35	⑤	⑤	⑤	0.06%S，0.05%P	为规定力学性能所必要的成分分析和热处理
90-60	620	90	415	60	20	40	⑤	⑤	⑤	0.06%S，0.05%P	为规定力学性能所必要的成分分析和热处理
105-85	725	105	585	85	17	35	⑤	⑤	⑤	0.06%S，0.05%P	为规定力学性能所必要的成分分析和热处理

（续）

等级或牌号	抗拉强度①		屈服强度①		50mm(2in)长的最小伸长率(%)	最小断面收缩率(%)	化学成分②(质量分数,%)			其他要求	条件和特定应用
	MPa	ksi	MPa	ksi			C	Mn	Si		
SAE J435c：见表2.3-66中由SAE J435c规定的合金钢铸件											
0022	—	—	—	—	—	—	0.12~0.22	0.50~0.90	0.60	187HB最大	适用于渗碳的低碳钢
0025	415	60	207	30	22	30	0.25③	0.75③	0.80	187HB最大	碳素钢焊接牌号
0030	450	65	241	35	24	35	0.30③	0.70③	0.80	131~187HB	碳素钢焊接牌号
0050A	585	85	310	45	16	24	0.40~0.50	0.50~0.90	0.80	170~229HB	中等强度的碳素钢牌号
0050B	690	100	485	70	10	15	0.40~0.50	0.50~0.90	0.80	207~255HB	中等强度的碳素钢牌号
080	550	80	345	50	22	35	—	—	—	163~207HB	中等强度的低合金钢
090	620	90	415	60	20	40	—	—	—	187~241HB	中等强度的低合金钢
HA，HB，HC⑥	—	—	—	—	—	—	0.25~0.34	⑥	⑥	见图2.3-21	淬硬钢(见图2.3-21)
ASTM A 216：适用于熔焊和高温应用的碳素钢铸件											
WCA	415~585	60~85	205	30	24	35	0.25	0.70③	0.60	⑦	压力容器零件
WCB	485~655	70~95	250	36	22	35	0.30	1.00③	0.60	⑦	压力容器零件
WCC	485~655	70~95	275	40	22	35	0.25	1.20③	0.50	⑦	压力容器零件
其他ASTM碳素钢牌号的铸钢技术规范⑧											
A352-LCA	415~585	60~85	205	30	24	35	0.25	0.70③	0.60	⑦⑨⑩	低温用途
A352-LCB	450~620	65~90	240	35	24	35	0.30	1.00	0.60	⑦⑩⑪	低温用途
A356-牌号1	485	70	250	36	20	35	0.35	0.70③	0.60	0.035%P最高，0.030%S最高	用于阀体、节气阀及其他蒸汽轮机的厚壁元件的铸件
A757-A1Q	450	65	240	35	24	35	0.30	1.00	0.60	⑩⑪⑫	用于压力容器和低温的铸件

注：除非另有说明，本表所列的所有牌号钢的 w(S)严格限于不超过0.045%，w(P)为0.040%。

①所示为单一数值的为最小值。②所示为单一数值的为最大值。③从规定的最高含碳量每减少0.01%C，就从规定的最高值增加0.04%Mn，直至ASTM技术规范所规定的最高值。④所示牌号可包括低合金钢，见表2.3-66中ASTM A 148中强度较高的牌号钢。⑤除非订购时另有规定，否则为了获得规定的力学性能，制造商可以选用ASTM A148所规定的化学成分。⑥按淬硬性采购，含有锰和其他要求添加的元素。⑦规定的残余元素包括0.30%Cu最高、0.50%Ni最高、0.05%Cr最高、0.20%Mo最高以及0.03%V最高，但总残余元素含量不得超过1.00%。⑧对于表中所列的一般性用途，这些ASTM技术规范业包括合金钢铸件。⑨试验温度为-32℃(-25℉)。⑩在规定温度下，两个试件在能量最小为18J(13lbf·ft)的条件下进行三次夏比V形缺口冲击试验，并取三次试验的平均值。⑪试验温度为-46℃(-50℉)。⑫规定的残余元素：0.03%V、0.50%Ni、0.40%Cr和0.25%Mo，总含量不超过1.00%。硫和磷含量分别不超过0.025%。

表 2.3-66　铬含量高至10%的不同合金钢铸件的技术规范要求一览表

材料型号①	抗拉强度②		屈服强度②		50mm(2in)长的最小伸长率(%)	最小断面收缩率(%)	化学成分③(质量分数,%)						
	MPa	ksi	MPa	ksi			C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其他
ASTM A 148：结构用途铸钢④													
115-95	795	115	655	95	14	30	—	—	—	—	—	—	⑤
135-125	930	135	860	125	9	22	—	—	—	—	—	—	⑤
150-135	1035	150	930	135	7	18	—	—	—	—	—	—	⑤
160-145	1105	160	1000	145	6	12	—	—	—	—	—	—	⑤
165-150	1140	165	1035	150	5	20	—	—	—	—	—	—	⑥
165-150L	1140	165	1035	150	5	20	—	—	—	—	—	—	⑥
210-180	1450	210	1240	180	4	15	—	—	—	—	—	—	⑥
210-180L	1450	210	1240	180	4	15	—	—	—	—	—	—	⑥
260-210	1795	260	1450	210	3	6	—	—	—	—	—	—	⑥
260-210L	1795	260	1450	210	3	6	—	—	—	—	—	—	⑥
SAE J435c：见表2.3-65中由SAE J435c所规定的碳素钢铸件⑦													
0105	725	105	586	85	17	35	—	—	—	—	—	—	⑧
0120	827	120	655	95	14	30	—	—	—	—	—	—	⑧
0150	1035	150	862	125	9	22	—	—	—	—	—	—	⑧
0175	1207	175	1000	145	6	12	—	—	—	—	—	—	⑧
ASTM A 217：用于压力容器和高温用途的合金钢铸件													
WC1	450~620	65~90	240	35	24	35	0.25	0.50~0.80	0.60	0.35⑨	0.50⑨	0.45~0.65	⑨⑩
WC4	485~655	70~95	275	40	20	35	0.20	0.50~0.80	0.60	0.50~0.80	0.70~1.10	0.45~0.65	⑩⑪
WC5	485~655	70~95	275	40	20	35	0.20	0.40~0.70	0.60	0.50~0.90	0.60~1.00	0.90~1.20	⑩⑪
WC6	485~655	70~95	275	40	20	35	0.20	0.50~0.80	0.60	1.00~1.50	0.50⑨	0.45~0.65	⑨⑩
WC9	485~655	70~95	275	40	20	35	0.18	0.40~0.70	0.60	2.00~2.75	0.50⑨	0.9~1.20	⑨⑩
WC11	550~725	80~105	345	50	18	45	0.15~0.21	0.50~0.80	0.30~0.60	1.00~1.75	0.50⑨	0.45~0.65	⑨⑫
C5	620~795	90~115	415	60	18	35	0.20	0.40~0.70	0.75	4.00~6.50	0.50⑨	0.45~0.65	⑨⑩
C12	620~795	90~115	415	60	18	35	0.20	0.35~0.65	1.00	8.00~10.00	0.50⑨	0.90~1.20	⑨⑩
ASTM A389：适用于高温下的熔焊和压力容器零件的合金钢铸件(NT)													
C23	485	70	275	40	18	35	0.20	0.30~0.80	0.60	1.00~1.50	—	0.45~0.65	⑧⑬

（续）

材料型号①	抗拉强度②		屈服强度②		50mm(2in)长的最小伸长率(%)	最小断面收缩率(%)	化学成分③(质量分数,%)						
	MPa	ksi	MPa	ksi			C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其他
ASTM A389：适用于高温下的熔焊和压力容器零件的合金钢铸件(NT)													
C24	550	80	345	50	15	35	0.20	0.30～0.80	0.60	1.00～1.25	—	0.90～1.20	⑧⑬
ASTM A487：适用于高温下的压力容器零件的合金钢铸件(NT 或 QT)													
1A(NT)	585～760	85～110	380	55	22	40	0.30	1.00	0.80	0.35⑭	0.50⑭	0.25⑭⑮	0.5Cu⑧⑭
2B (QT)㊀	620～795	90～115	450	65	22	45	0.30	1.00	0.80	0.35⑭	0.50⑭	0.25⑭⑮	0.5Cu⑧⑭
1C(NT 或 QT)	620	90	450	65	22	45	0.30	1.00	0.80	0.35⑭	0.50⑭	0.25⑭⑮	0.5Cu⑧⑭
2A(NT)	585～760	85～110	365	53	22	35	0.30	1.10～1.40	0.80	0.35⑨	0.50⑨	0.10～0.30	⑨⑯
2B (QT)	620～795	90～115	450	65	22	40	0.30	1.10～1.40	0.80	0.35⑨	0.50⑨	0.10～0.30	⑨⑯
2C(NT 或 QT)	620	90	450	65	22	40	0.30	1.10～1.40	0.80	0.35⑨	0.50⑨	0.10～0.30	⑨⑯
4A(NT 或 QT)	620～795	90～115	415	60	20	40	0.30	1.00	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.15～0.30	⑪⑯
4B (QT)	725～895	105～130	585	85	17	35	0.30	1.00	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.15～0.30	⑪⑯
4C(NT 或 QT)	620	90	415	60	20	40	0.30	1.00	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.15～0.30	⑪⑯
4D(QT)	690	100	515	75	17	35	0.30	1.00	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.15～0.30	⑪⑯
4E (QT)	795	115	655	95	15	35	0.30	1.00	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.15～0.30	⑪⑯
6A(NT)	795	115	550	80	18	30	0.38	1.30～1.70	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.30～0.40	⑪⑯
6B (QT)	825	120	655	95	15	35	0.38	1.30～1.70	0.80	0.40～0.80	0.40～0.80	0.30～0.40	⑪⑯
7A(QT)⑰	795	115	690	100	15	30	0.20	0.60～1.00	0.80	0.40～0.80	0.70～1.00	0.40～0.60	⑪⑯⑱
8A(NT)	585～760	85～110	380	55	20	35	0.20	0.50～0.90	0.80	2.00～2.75	—	0.90～1.10	⑪⑯
8B (QT)	725	105	585	85	17	30	0.20	0.50～0.90	0.80	2.00～2.75	—	0.90～1.10	⑪⑯
8C(QT)	690	100	515	75	17	35	0.20	0.50～0.90	0.80	2.00～2.75	—	0.90～1.10	⑪⑯

㊀ 原文疑有误，改为1B(QT)。——译者注。

（续）

材料型号①	抗拉强度②		屈服强度②		50mm(2in)长的最小伸长率(%)	最小断面收缩率(%)	化学成分③(质量分数,%)						
	MPa	ksi	MPa	ksi			C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其他
ASTM A487：适用于高温下的压力容器零件的合金钢铸件(NT 或 QT)													
9A (NT 或 QT)	620	90	415	60	18	35	0.33	0.60 ~ 1.00	0.80	0.75 ~ 1.10	0.50⑨	0.15 ~ 0.30	⑨⑯
9B (QT)	725	105	585	85	16	35	0.33	0.60 ~ 1.00	0.80	0.75 ~ 1.10	0.50⑨	0.15 ~ 0.30	⑨⑯
9C(NT 或 QT)	620	90	415	60	18	35	成分与9A(NT 或 QT)一样，但回火温度稍高一些。						
9D (QT)	690	100	515	75	17	35	0.33	0.60 ~ 1.00	0.80	0.75 ~ 1.10	0.50⑨	0.15 ~ 0.30	⑨⑯
10A(NT)	690	100	485	70	18	35	0.30	0.60 ~ 1.00	0.80	0.55 ~ 0.90	1.40 ~ 2.00	0.20 ~ 0.40	⑪⑯
10B (QT)	860	125	690	100	15	35	0.30	0.60 ~ 1.00	0.80	0.55 ~ 0.90	1.40 ~ 2.00	0.20 ~ 0.40	⑪⑯
11A(NT)	485 ~ 655	70 ~ 95	275	40	20	35	0.20	0.50 ~ 0.80	0.60	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.10	0.45 ~ 0.65	⑯⑲
11B (QT)	725 ~ 895	105 ~ 130	585	85	17	35	0.20	0.50 ~ 0.80	0.60	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.10	0.45 ~ 0.65	⑯⑲
12A(NT)	485 ~ 655	70 ~ 95	275	40	20	35	0.20	0.40 ~ 0.70	0.60	0.50 ~ 0.90	0.60 ~ 1.00	0.90 ~ 1.20	⑯⑲
12B (QT)	725 ~ 895	105 ~ 130	585	85	17	35	0.20	0.40 ~ 0.70	0.60	0.50 ~ 0.90	0.60 ~ 1.00	0.90 ~ 1.20	⑯⑲
13A(NT)	620 ~ 795	90 ~ 115	415	60	18	35	0.30	0.80 ~ 1.10	0.60	0.40⑳	1.40 ~ 1.75	0.20 ~ 0.30	⑯⑳
13B (QT)	725 ~ 895	105 ~ 130	585	85	17	35	0.30	0.80 ~ 1.10	0.60	0.40⑳	1.40 ~ 1.75	0.20 ~ 0.30	⑯⑳
14A(QT)	825 ~ 1000	120 ~ 145	655	95	14	30	0.55	0.80 ~ 1.10	0.60	0.40⑳	1.40 ~ 1.75	0.20 ~ 0.30	⑯⑳
16A(NT)㉑	485 ~ 655	70 ~ 95	275	40	22	35	0.12㉒	2.10㉒	0.50	0.20⑲	1.00 ~ 1.40	0.10⑲	⑲㉓

①NT，正火和回火，QT，淬火和回火。 ②所示为单一数值的为最小值。 ③所示为单一数值的为最大值。 ④除非订购时另有规定，否则为了获得规定的力学性能，制造商可以选用 ASTM A148 所规定的化学成分。因此可包括碳素钢或合金钢，见由 ASTM A148 所规定的较低牌号的钢。 ⑤0.06%S(最高)，0.05%P(最高)。 ⑥0.020%S(最高)，0.020%P(最高)。 ⑦与 ASTM A148 的铸钢相似。 ⑧0.045%S(最高)，0.040%P(最高)。 ⑨当规定铜、镍、铬、钨和钒的最高残余含量时，它们的总含量不超过1.00%。 ⑩0.50%Cu(最高)、0.10%W(最高)、0.045%S(最高)、0.04%P(最高)。 ⑪当规定铜、镍、铬、钨和钒的最高残余含量时，它们的总含量不超过0.60%。 ⑫0.35%Cu(最高)、0.03%V(最高)、0.015%S(最高)、0.020%P(最高)。 ⑬0.15%~0.50%V。 ⑭当规定铜、镍、铬和钼(加上钨)的最高残余含量时，它们的总含量不超过1.00%。 ⑮包括残余含量钨。 ⑯0.50%Cu(最高)、0.03%V(最高)、0.045%S(最高)、0.04%P(最高)。 ⑰7A 类材料是一种专利钢，规定最大厚度为63.5mm(2½in)。 ⑱规定的元素包括0.15%~0.50%Cu、0.03%~0.10%V 和0.002%~0.006%B。 ⑲当规定铜、镍、铬、钨、钼和钒的最高残余含量时，它们的总含量不超过0.50%。 ⑳当规定铜、镍、铬、钨和钒的最高残余含量时，它们的总含量不超过0.75%。 ㉑双奥氏体化低碳牌号钢。 ㉒从规定的最高含碳量每减少0.01%C，就从规定的最高值增加0.04%Mn，直至增加到2.30%。 ㉓0.20%Cu(最高)、0.10%W(最高)、0.02%V(最高)、0.02%S(最高)、0.02%P(最高)。

在低强度的范围里，一些技术规范用于限制碳和锰的含量，并常以此确保获得令人满意的焊接性能。SAEJ435c所规定的碳和锰含量，能保证经热处理后获得最低限度的硬度和强度。对于特种用途，则要根据特性的需求规定其他元素的最高或最低含量。

如果只规定力学性能，那么作为一般的工程用途的化学成分可留给供应商自行决定。然而对于特定用途，为了确保经适当的热处理后能形成一定的力学性能，并能满足易于焊接、热处理后的均匀性或其他方面的要求，就得设定一定的化学成分限量。对于大部分SAE J435c牌号的钢都有硬度的规定，用于保证其切削性和在高生产率的条件下便于检验或与磨损密切相关的某些特性。

SAE J435c包括三种牌号的钢：HA、HB和HC，都有规定的淬硬性要求。图2.3-21所示是这些钢的淬硬性的最高和最低要求。淬硬性可以通过本章“钢的淬硬性”一节所介绍的端淬淬硬性试验测定。其他技术指标要求为在端淬试件上的一处或两处的最低硬度。一般来说，规定淬硬性是为了保证所要求的厚度通过淬火能达到从奥氏体到马氏体的预定转变程度。这对于要求具有韧性和最佳抗疲劳性的关键性零件来说是很重要的。

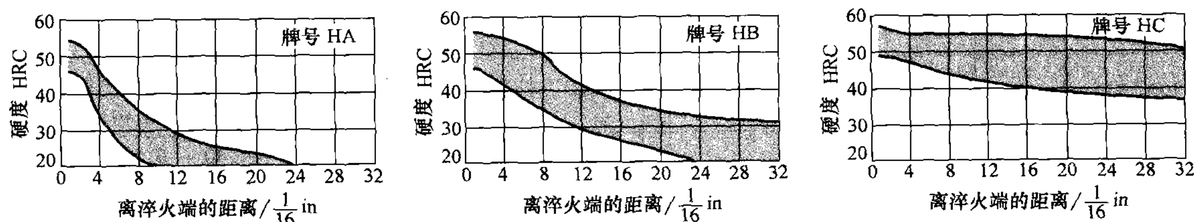


图2.3-21 SAE J435c规定的铸钢淬硬性牌号的钢材端淬淬硬性极限。这些钢的名义含碳量(质量分数)为0.30% C(表2.3-65)。为使生产的铸件满足这些极限，锰及其他合金元素按要求加入

特别当客户在其他加工工序之后还要对零件进行热处理的时候，就要严格按照与SAE-AISI的锻钢成分相当的成分极限值订购铸件，而含硅量可允许高一些。就像其他的铸钢件一样，最好不要规定硅的含量范围，但允许浇铸使用硅和锰的组合，这是要求浇铸的形状完整所需要的。铸钢的硅含量常高于锻钢中相同的名义成分。$w(\mathrm{Si})$高于0.80%的硅含量才可认为是一种合金添加，因为此时能有效防止发生回火。

力学性能

一般特征。图2.3-22所示是通过四种不同的热处理，碳素钢铸件的力学性能作为含碳量函数表现出来的基本趋势。对于一种确定的热处理，较高的含碳量会造就较高的硬度和强度，但韧性和塑性较低。因为在结构用途里，屈服强度是一个主要的设计参数，图2.3-23示出了低合金铸钢的抗拉强度、塑性(用其伸长率衡量)和韧性(以夏比V形缺口冲击吸收功为依据)相对其屈服强度的关系。

抗拉强度和屈服强度。如果在一定的硬度和淬硬性条件下对铁素体钢进行比较，铸造的、轧制的和焊接的金属的抗拉强度和屈服强度实际上都是一致的，而与其合金含量无关。于是若是以抗拉强度和屈服强度作为控制参数，设计人员则可以在轧制、锻造、焊接和铸造的钢材之间进行互换选材。

塑性。在硬度相同的情况下，铸钢件的塑性与锻件、轧制件或焊接件的几乎一样。轧制件或锻件的纵向性能要比铸件或焊接件高一些，但是其横向的性能则要低一些，所降低的程度取决于其加工的程度。当使用的条件包含着多方向的载荷时，作为铸钢件的无方向特性无疑更具优越性。

韧性。缺口试棒的冲击试验常用于测试材料的韧性，而且在决定材料从其塑性断裂到脆性断裂的转变温度尤为有用。按照ASTM E208方法测定无塑性转变温度(NDTT)、横向延伸值和在特定温度下吸收的能量值都属于评估冲击特性的多种不同指标中的一部分。通常查表所得的锻钢冲击特性都是指其纵向的，其数值高于化学成分和热处理都相似的铸钢。在转变温度以上，锻钢的横向冲击性能一般为其纵向的50%~70%，而且在某些成分条件和变形加工状况下甚至更低。因为铸钢件是无方向性的，所以它们的冲击性能通常介于具有相似化学成分的锻钢纵向和横向的性能之间。

冲击性能是受制于显微组织的，而且一般不会明显地受显微缩孔以及氢的影响。受化学成分和热处理控制的显微组织所起的影响将在本章的第13节“钢的缺口韧性”中讨论。专用于低温压力容器零件的铸钢，其冲击吸收功相对于温度变化的曲线如图2.3-24所示。这些曲线表明在改变钢牌号和热处理的影响下，冲击性能有着明显的变化。

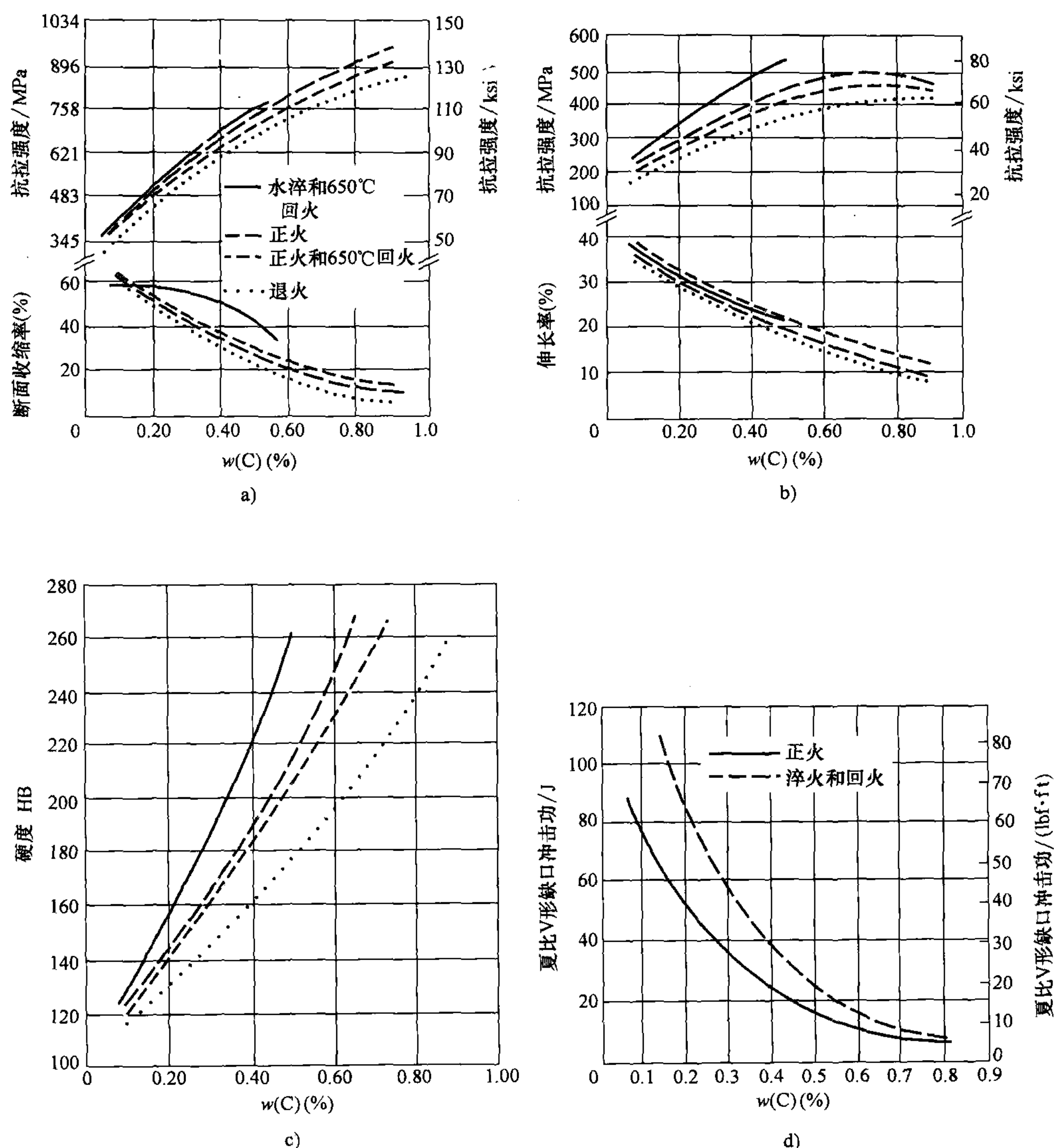


图 2.3-22　作为含碳量和热处理的函数的碳素钢铸钢性能

a）抗拉强度和断面收缩率　b）屈服强度和伸长率　c）布氏硬度　d）夏比 V 形缺口冲击吸收功

截面大小也会影响其已经获得的冲击性能。图 2.3-25 所示就是图 2.3-24 中的一种铸钢牌号（LCB 号钢）的这种影响。当截面尺寸从 25mm 增大到 127mm（1 ~ 5in）时，要使冲击吸收功降低到均值 18J（13lbf · ft），温度就要提高 28℃（50℉）。

疲劳强度。利用光滑试棒试验所得到的铸钢疲劳极限或寿命极限一般介于抗拉强度的 40% ~50%。图 2.3-26 为锻钢和铸钢两种钢材的疲劳寿命极限的比较。虽然锻钢的无缺口疲劳寿命极限比较高，但是它们对于缺口的敏感性要比铸钢的大许多。

截面尺寸及质量的影响。铸造试件或铸件的尺寸对于其力学性能会有明显的影响。这种影响反映在热处理的过程中，其截面大小对于所能实现的冷却速率的影响，截面大其质量也大，则会降低在该截面内的冷却速率，从而影响在冷却过程中形成的显微组织和力学性能。在退火或者铸造条件下，增大尺寸对中碳钢铸钢力学性能造成的影响如图 2.3-27 所示。由于截面尺寸的影响，从非常大的截面上和从大型铸件上取用的试件，其试验结果有助于预测铸钢件零件的最低性能。

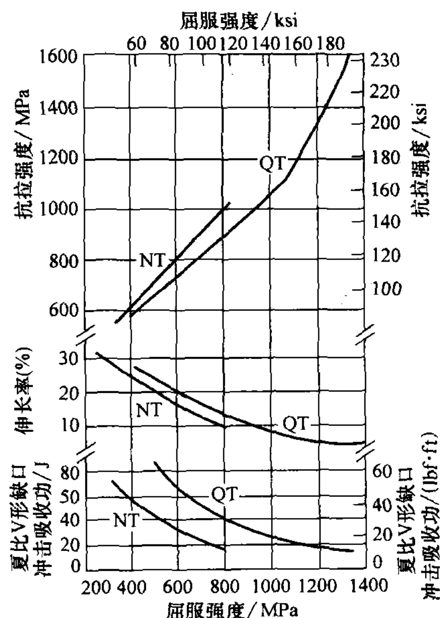


图2.3-23　低合金铸钢的室温性能。QT，淬火和回火；NT，正火和回火

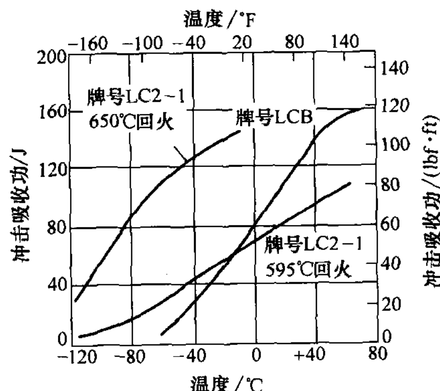


图2.3-24　温度对在低温下使用的铸钢的夏比V形缺口冲击吸收功的影响。钢号符合ASTM A352。热处理规范如下：钢号LCB(w(C)最高为0.30%、w(Mn)最高为1.00%的钢)：从890℃(1650℉)开始水淬、650℃(1200℉)回火和水淬、425℃(800℉)时效40h、595℃(1100℉)应力释放40h，钢号LC2-1(Ni-Cr-Mo钢)：955℃(1750℉)正火和空冷、再加热890℃(1650℉)和水淬、595℃(1100℉)回火和425℃(800℉)时效40h或650℃(1200℉)回火和425℃(800℉)时效64h。所有的试件取自于尺寸为51×210×229mm(2×8¼×9in)，并ASTM晶粒大小为6~8的试块的表面下超过四分之一的厚度处。曲线代表在每一种温度下若干次试验结果的平均值

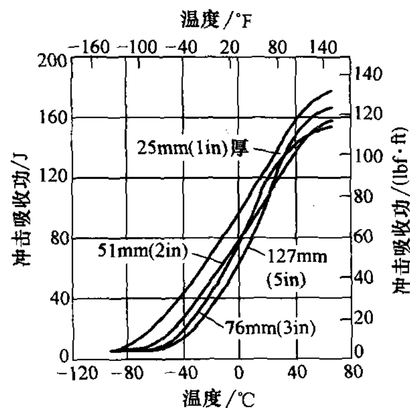


图2.3-25　LCB号铸钢件的截面厚度对夏比V形缺口冲击试验曲线的影响。其钢号符合ASTM A352。热处理与图2.3-24的相同。所有的试件分别取自于尺寸为25mm×25mm×279mm(1in×1in×11in)、51mm×210mm×229mm(2in×8¼in×9in)、76mm×229mm×283mm(3in×9in×11⅛in)和127mm×381mm×381mm(5in×15in×15in)，且ASTM晶粒大小为6~8的试块的表面下超过1/4的厚度处。曲线代表在每一种温度下若干次试验结果的平均值

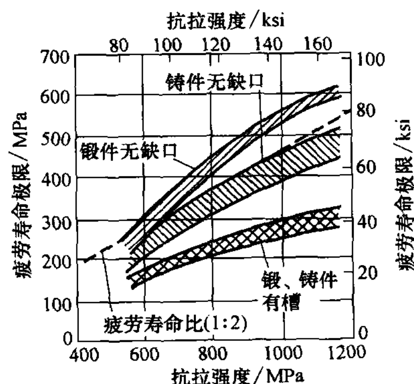


图2.3-26　经不同热处理的带缺口和不带缺口的铸钢和锻钢的疲劳寿命极限对抗拉强度的曲线。数据引自R. R. Moore旋转束疲劳试验，理论应力集中系数=2.2

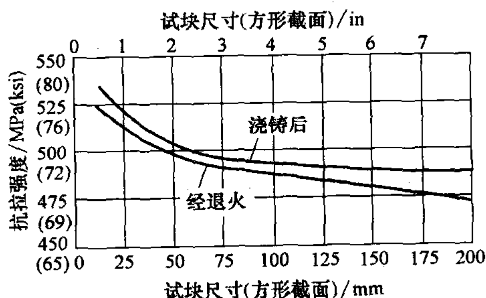


图2.3-27　中碳钢铸件的截面尺寸对抗拉强度的影响

低碳钢铸钢

低碳钢铸钢就是 w(C)低于0.20%的铸钢。大部分批量生产的低碳钢种类的钢含有(质量分数)0.16%~0.19% C 以及0.50%~0.80% Mn、0.05% P(最高)、0.06% S(最高)和0.35%~0.70% Si。为了得到能用于电气设备的高磁性钢，w(Mn)通常控制在0.10%~0.20%。

生产的低碳钢铸件中重要的有两大类。一类称为铁轨铸钢件，而其他的则为各种小批量铸钢件。铁轨铸钢件主要有相对对称和设计较为成熟的铸件，这类铸件的有害应力条件都经过仔细的研究并得到防止。而小批量铸钢件在设计上有着很大的不同，常包含轻薄和厚实的截面的连接，截面的变化使得在铸造后很难避免残余应力的产生。而在许多实际用途中大幅度的残余应力都是不允许的，故应力的消除便是必不可少的。因此退火对这类铸件来说肯定是有益的，即使力学性能因此得不到提高。

图2.3-22所示为 w(C)为0.10%~0.20%的低含碳量范围的碳素钢铸钢的力学性能。对于低碳钢，用正火热处理得到的力学性能与充分退火后的力学性能两者之间的差别是非常小的。

中碳钢铸钢

中碳钢铸钢的牌号含有(质量分数)0.20%~0.50% C，它们代表铸钢件生产的主体，此外，它们还含有(质量分数)0.50%~1.50% Mn、0.05% P(最高)、0.06% S(最高)和0.35%~0.80% Si。w(C)为0.20%~0.50%的铸钢在室温下的力学性能也如图2.3-22所示。在该含碳量范围里的钢都要进行热处理，用于消除铸件的应变、细化铸造组织以及提高钢的塑性。这种铸钢件的非常大批量的生产都要用正火再加上回火的热处理。

高碳钢铸钢

w(C)高于0.50%的铸钢归类于高碳钢。这种牌号钢含有(质量分数)0.50%~1.50% Mn、0.05% P(最高)、0.05% S(最高)和0.35%~0.70% Si。高碳钢在室温下的力学性能如图2.3-22所示。高碳钢常需进行充分的退火，偶尔用正火和回火处理，特定用途则需采用油淬和回火处理。

高碳钢的显微组织通过热处理来控制。碳含量对它也有明显的影响，如在共析成分(w(C)接近0.83%)会形成100%的珠光体组织。超过共析成分的含碳比例将会增加先共析渗碳体，不适当的热处理(例如从高于 A_{cm} 的温度缓慢冷却)会在其晶界形成网络，这对于铸件是有害的。较快速的冷却可以防止这种网络的形成，从而改善其性能。

低合金铸钢

低合金钢铸钢的合金元素总含量(质量分数)低于8%。这类钢的开发和广泛应用所能满足的特殊要求都是使用普通碳素钢(因其淬硬性低)而无法达到的。可以根据以下任何一种理由在普通碳素钢铸件里添加合金元素：更高的淬硬性、更高耐磨性、在提高强度的条件下具有更高的耐冲击能力、甚至在更高的硬度下都有好的切削性能、在高温或低温下的更高强度以及更强的耐腐蚀性和抗氧化性。这些材料可以满足485~1380MPa(70~200ksi)的抗拉强度，并伴随一某些上述的特殊要求。图2.3-23所示是低合金钢在室温下一些典型的力学性能相对其屈服强度的关系。当然这些性能也是合金元素的含量、热处理和截面尺寸的函数。

第8节　轴　承　钢

滚动轴承，无论是球轴承还是球面的、直形或锥形的滚子轴承，都可以用种类繁多的钢材进行制造。从广义上看，轴承钢分为两大类：标准轴承钢适用于正常的使用条件(见接下来所讨论的)，而特种用途的轴承钢不是为了能获得很长的疲劳寿命，就是为了能在超乎寻常的温度和腐蚀的条件下运行。作为在正常条件下工作的、在所有滚动轴承中的95%以上的滚动轴承都是在以下工况条件下使用的，这也就是正常的使用条件：

- 最高温度范围为120~150℃(250至300℉)，即使漂移到175℃(350℉)，一般也是能够承受的。
- 最低环境温度约为-50℃(-60℉)。
- 接触表面采用油、脂或油雾进行润滑。
- 最大赫兹接触应力为2.1~3.1GPa(300~450ksi)。

在正常条件下应用的轴承还要经受震动、冲击、安装不同轴、杂质颗粒和搬运。因此生产所用的材料必须要有韧性、一定程度的耐回火性以及在极端温度下的显微组织稳定性。显然为了耐磨和抗疲劳特别是滚动接触疲劳，材料还必须要有表面硬度的要求。

轴承钢的生产和特性

除了通过钢牌号和热处理的适当组合来获得满意的显微组织以外，能获得所要求的滚动接触疲劳寿命的一个最重要因素就是钢的清洁度，即不含有害的非金属夹杂物。为此轴承钢采用下列之一的技术进行生产：

- 清洁钢的空气冶炼技术。
- 电渣重熔。
- 空气熔化，继之以真空电弧重熔。
- 真空感应熔化，继之以真空电弧重熔（VIM/VAR）。

根据所采用的技术，其清洁度、成本和可靠性会得到提高。

轴承钢的清洁度最普通的是用显微镜技术进行评定，如适用于高碳钢的ASTM A295和渗碳钢的ASTM A534。将经金相制备的钢试样截面上观察到的最差视场与按照杂质类型，如硫化物、长条形氧化物、硅化物和球状氧化物所编制的评定图谱（J-K图谱）进行比较。

轴承钢的清洁度还能用氧分析、磁粉法（AMS 2301，AMS 2300）和超声波法进行评定。利用声学显微镜技术分析的夹杂物图像及其长度检测可以作为定量超声波分析结果的补充。这些工具再结合使用扫描电镜的能谱或波谱化学成分分析，就能确定在导致材料疲劳的工况条件下氧化铝板条与轴承疲劳寿命之间的直接联系。通过钢材单位体积中的线状夹杂物长度总和计算，将可以用一组特定轴承中的线状夹杂物的大小分布及其总量来表示与其性能（疲劳寿命）的关联。

单位体积中的线状夹杂物的总长度就是图2.3-28中的横坐标。钢材的清洁度工艺从早期的真空脱氧炼钢工艺开始发展到今天沉淀遮蔽式的空气熔炼钢和真空电弧重熔钢。如图2.3-28所示，整个疲劳寿命的变化过程超过一个数量级的变化。VIM/VAR钢的寿命甚至超过VAR钢的寿命；因此，尽管目前空气熔炼钢确实达到了较高的寿命，但真空冶炼的钢更能满足那些需要长寿命的用途对于疲劳寿命的要求。

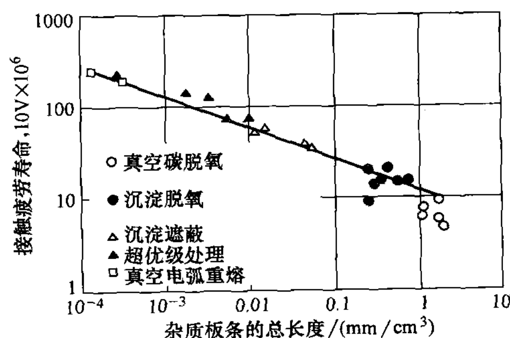


图2.3-28　杂质板条的总长度对于内径为220mm（8.7in）的圆锥轴承内圈的滚动接触疲劳寿命的影响，此时寿命是钢材清洁度的函数

标准轴承钢

为满足正常使用要求，如应用于工业或汽车的滚动轴承用钢，都是除了碳以外再添加合金元素的合金钢，其合金添加量（质量分数）从接近1.5%~6%，取决于轴承环的横截面和淬硬性要求。作为高碳钢和整体淬火钢的典型标准轴承钢的化学成分如表2.3-67所示，用于低碳钢或渗碳轴承钢的标准轴承钢的化学成分则如表2.3-68所列。这两种钢的使用取决于其特定的应用条件需要。高碳钢有下列优点：

- 承受较高的接触应力的能力，如在球轴承里所承受的点接触载荷。
- 与渗碳相比，采用较为简单的淬火和回火热处理。
- 要求在严酷的温度条件下尽可能有较高的尺寸稳定性，这是由于其残留奥氏体含量较低的特征。

另一方面，渗碳钢则有下列优点：

- 有较高的表面塑性（由于其残留奥氏体含量），能更好地抵制因应力的增加而由平面度、同轴度以及杂质颗粒所造成的影响。
- 具有较高的心部韧性，以防止在严酷工作条件下发生整个元件上的断裂。
- 形成残余压缩表面应力条件，以此抵御作用于滚子轴承挡边上的弯曲载荷，并降低疲劳裂纹通过其横截面的扩展速度。
- 在其制造过程中，其基体材料的加工更为容易。

高碳轴承钢和渗碳轴承钢的表面硬度的范围都为58~64HRC，但两种材料的心部硬度是有些不同的。表2.3-68所列数据表明，低碳钢经淬火和回火后，其心部的强度和韧性高于高碳钢的轴承零件经感应淬火后未曾得到淬火的部分。

从表面疲劳的观点看，有必要在表面和亚表层保持足够的硬度，以防止发生磨料磨损和粘着磨损，并使整个表面和亚表层发生接触疲劳的可能性降低到最低限度，从而每一点的材料强度都高于加载后由表面赫兹应力所产生的表面和亚表层的切应力。图2.3-29所示是硬度与作用于这两种钢的剪切屈服强度之间的估计关系。一种钢材在轴承上的成功应用并不能与这种钢经过怎样的处理所获得的功能划等号。抗疲劳性一般随硬度的提高而增加，其最大值取决于钢的种类。作为表面硬度的函数，淬透钢和渗碳钢的弯曲疲劳寿命的比较如图2.3-30所示。在弯曲疲劳中，表面残留压应力与较高的复合截面韧性两者相结合，则比渗碳钢有更多的优势。

表 2.3-67　高碳轴承钢的名义化学成分

牌　号	化学成分(质量分数,%)					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 52100	1.04	0.35	0.25	1.45	—	—
ASTM A485-1	0.97	1.10	0.60	1.05	—	—
ASTM A485-3	1.02	0.78	0.22	1.30	—	0.25
TBS-9	0.95	0.65	0.22	0.50	0.25 最大	0.12
SUJ 1①	1.02	<0.50	0.25	1.05	<0.25	<0.08
105Cr6②	0.97	0.32	0.25	1.52	—	—
SHKH15-SHD③	1.00	0.40	0.28	1.48	<0.30	—

①日本牌号。　②德国牌号。　③俄罗斯牌号。

表 2.3-68　渗碳轴承钢的名义化学成分

牌　号	化学成分(质量分数,%)					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
4118	0.20	0.80	0.22	0.50	—	0.11
5120	0.20	0.80	0.22	0.80	—	—
8620	0.20	0.80	0.22	0.50	0.55	0.20
4620	0.20	0.55	0.22	—	1.82	0.25
4320	0.20	0.55	0.22	0.50	1.82	0.25
3310	0.10	0.52	0.22	1.57	3.50	—
SCM420	0.20	0.72	0.25	1.05	—	0.22
20MnCr5	0.20	1.25	0.27	1.15	—	—

表 2.3-69　渗碳与感应淬火零件的心部性能的对照

材　料	硬度 HB	屈服强度		极限抗拉强度		冲击吸收功		切削性①(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	J	lbf · ft	
8620②	30~45HRC	825~965	120~140	1105~1240	160~180	55~110	40~80	65
5160③	197	275	40	725	105	10	7	55
1095③	192	380	55	655	95	3	2	45
52100③	197	345	50	635	92	—	—	40

①以 1212 碳素钢代表 100%。　②淬火和回火。　③退火。

高碳轴承钢的特征。经淬火和回火的轴承钢基体组织为高碳马氏体，主要包含碳化物以及 5%~10% 的残留奥氏体。整个断面上的硬度一般为 60~64HRC。表 2.3-67 选列了目前使用的高碳轴承钢的成分。第一类的牌号钢是按照淬硬性增加的顺序排列，它们应用于增加厚度的轴承元件上，以此保证在淬火过程中不发生非马氏体的转变。牌号 TBS-9 是一种含铬量较低的轴承钢，由于所含残余合金元素，这种轴承钢具有与 SAE-AISI 52100 相似的淬硬性。其余的钢也都是在国外用于轴承零件的代表性钢材。

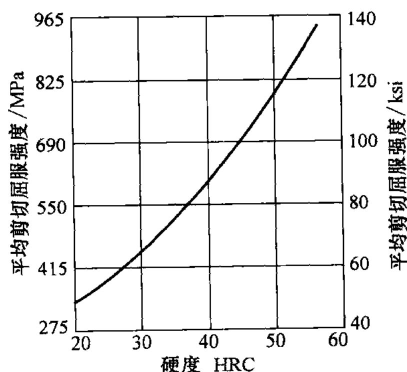


图 2.3-29　一般轴承钢的剪切屈服强度对硬度的变化曲线

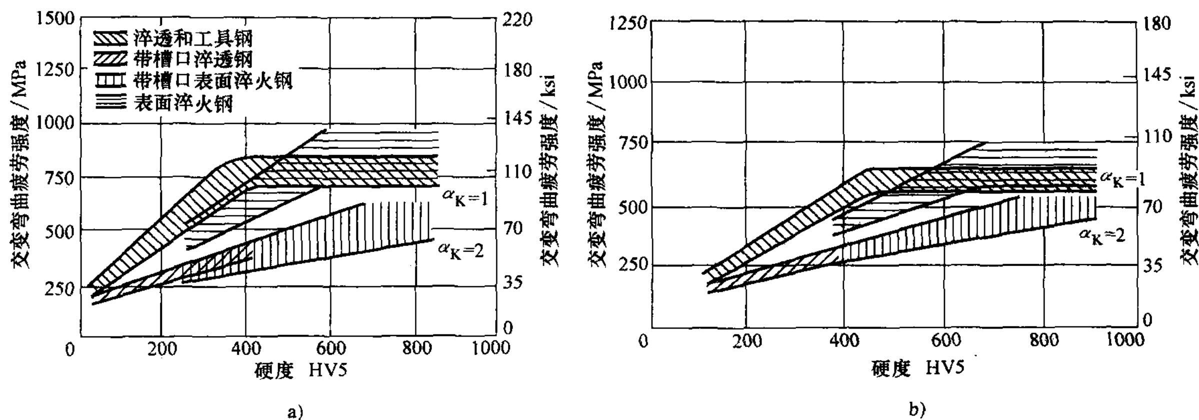


图2.3-30　表面淬火钢和淬透钢的旋转束疲劳强度，图示曲线为其作为硬度的函数。αk为应力集中系数。
a）试件直径为6mm(0.25in)，三角扭矩　b）试件直径为12mm(0.5in)，恒定扭矩

渗碳轴承钢的特征。渗碳轴承钢的表层显微组织是由含有15%~40%的残留奥氏体（较高含量的残留奥氏体可以提高滚动接触疲劳寿命）的高碳马氏体组成的。表面淬火硬度一般为58~64HRC。在渗碳轴承钢的心部，其显微组织是由低碳马氏体构成的，还含有不同量的贝氏体和铁素体。其心部的硬度为25~48HRC。

表2.3-68所列是一般渗碳钢的化学成分。SAE-AISI牌号钢大致按淬硬性的增加或元件尺寸的适用性排列。SCM420和20MnCr5分别为日本和德国的牌号，用于渗碳轴承零件。除了SAE-AISI牌号以外，轴承钢也可以按照淬硬性与特定的元件厚度相吻合的方法进行命名。恒定的合金含量以及较为稳定的热处理特性对于使用特别命名的轴承钢是有益的。

无论是从渗碳直接淬火还是重新加热再淬火，都要根据生产厂家的热处理工艺条件以及淬火设备的特点来为特定的轴承元件选用渗碳钢。图2.3-31表明，合适的渗碳表层显微组织相对于轴承耐点蚀疲劳能力的重要性，尤其是由于淬火的工况条件与表面淬硬性的不相适应会造成珠光体的出现，可以看到由此引起的负面影响。

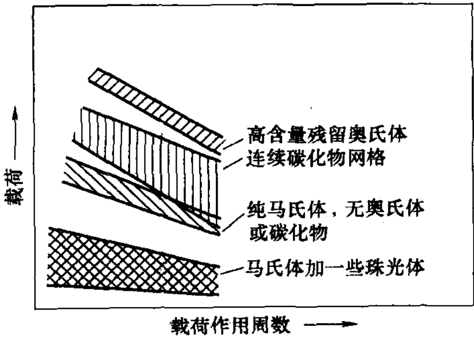


图2.3-31　表面疲劳(点蚀)的表面显微组织对*S-N*曲线的形状的影响

特殊用途的轴承钢

当轴承的工作温度超过大约150℃(300℉)时，普通的低合金钢无法为得到满意的疲劳寿命而维持必要的表面硬度。这种钢的耐腐蚀性也低，故容易受环境潮湿以及侵蚀性的气体或液体污染物的侵蚀。因此，当存在这种工况条件时，就常要使用特种钢。

高温中应用的轴承钢。表2.3-70所列是特别适

表2.3-70　高温轴承钢的名义化学成分

钢　号	化学成分(质量分数,%)								最高工作温度[①]	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	其他	℃	℉
M50	0.85	—	—	4.10	—	4.25	1.00	—	315	600
M50-NiL	0.13	0.25	0.20	4.20	3.40	4.25	1.20	—	315	600
Pyrowear 53	0.10	0.35	1.00	1.00	2.00	3.25	0.10	2.00Cu	205	400
CBS-600	0.19	0.60	1.10	1.45	—	1.00	—	0.06Al	230	450

（续）

钢 号	化学成分(质量分数,%)								最高工作温度①	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	其他	℃	℉
VascoX2-M	0.15	0.29	0.88	5.00	—	1.50	0.5	1.50W	230	450
CBS-1000M	0.13	0.55	0.50	1.05	3.00	4.50	0.40	0.06Al	315	600
BG42	1.15	0.50	0.30	14.5	—	4.00	1.20	—	370	700

①根据58HRC的最小热硬度规定的最高工作温度。

合高温下工作的轴承钢的化学成分。这些钢一般通过以如铬、钼、钒和硅作为碳化物-稳定化元素的合金熔入，来提高其热硬性和抗回火性。所列的最高工作温度就是当其硬度降低到最低工作硬度58HRC以下时的温度。图2.3-32为不同工具钢和轴承钢的热硬度特性的比较。

飞机和固定式涡轮发动机是高温轴承钢的重要用途。用M50制造的轴承，多年来一直应用于发动机上。为了提高性能和效率，喷气式发动机的速度在不断提高，因此用于这些发动机上的轴承材料也必须增加其元件的韧性，以此承受由较高的离心力而引起的应力。为此，渗碳高温轴承钢，如M50-NiL和CBS-1000M正受到更多的关注。这种钢的心部韧性超过淬透钢的2倍以上。

一般来说，用于高温轴承钢的渗碳工艺比常规用的低合金渗碳钢的要求更高。由于在高温钢中高含量的铬与硅，总有必要进行一些预渗碳处理以便提高渗碳的满意程度。

耐腐蚀轴承钢。要求最高耐腐蚀能力的轴承必须使用$w(\mathrm{Cr})$在12%以上的不锈钢牌号。目前，对于这类牌号钢尚没有令人满意的渗碳技术可以使用，因此所有的耐腐蚀轴承钢都是淬硬性钢(表2.3-71)。如440C改进型、CRB-7和BG42还能提供较好的高温硬度。

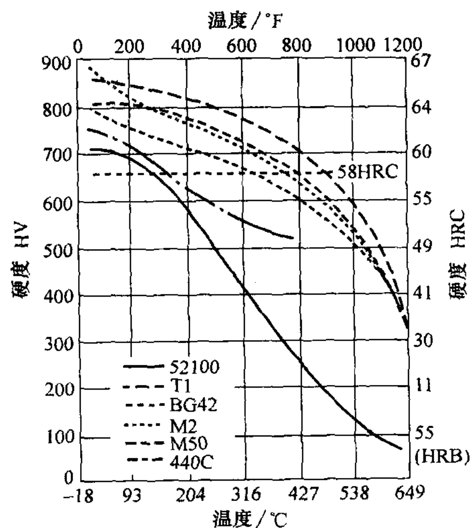


图2.3-32 在高于150℃(300℉)温度下工作的均质高碳钢的热硬性。位于硬度为58HRC处的虚线表示轴承或齿轮能够承受约为2100MPa基本动态载荷时的能力最高工作温度

表2.3-71 耐腐蚀轴承钢的名义化学成分

牌 号	化学成分(质量分数,%)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Nb
BG42	1.15	0.50	0.30	14.50	4.00	—	1.2	—
440C	1.00	0.40	0.30	17.00	0.50	—	—	—
440C改进型	1.05	0.40	0.30	14.00	4.00	—	—	—
CRB-7	1.10	0.35	0.30	14.00	2.00	—	1.0	0.25

第9节 高强度结构钢和高强度低合金钢

本节所讨论的钢是以其比普通碳素结构钢有更高的屈服强度为特征的。它们分为三类：①屈服强度从最低275～550MPa(40～80ksi)；②微合金化的高强度低合金钢(HSLA)，通过添加合金元素并结合可控热轧而使性能得到改善(HSLA的性能介于普通碳素

结构钢和经热处理的高强度碳素钢和低合金结构钢之间)；③经淬火和回火的低合金钢牌号，其屈服强度从最低550～1030MPa(80～150ksi)，以满足如ASTM A514所规定的技术要求。第10节中将要介绍屈服强度更高(高于1380MPa或200ksi)的钢材。

高强度和HSLA牌号钢一般可以按所有各种锻钢的形式使用：薄钢板、带钢、厚钢板、结构型材、棒材、棒形型材和特殊型材。这些钢也可生产冷轧钢板或带钢，其厚度可达1.6mm(1/16in)，用于厚度受控的结构用途(如车身钢板)，或用于为表面镀层而需提高其表面粗糙度的零件。

一些经热处理的牌号钢都可作为厚钢板、棒材，偶尔还有薄钢板和结构型材使用。当要用于一些需要包括热成形的用途时，它们一般都以非经热处理的状态供货。还有，半成品的轧制件也可以作为锻件使用。这些产品经过成形或锻造之后，可进一步通过热处理提高强度。

高强度钢用于生产需要有规定力学性能的产品，对于不同的厚度范围，这些性能可以稍许有些不同。化学成分的最高极限一般都是由颁布的标准规定的，因为其不同的碳含量和合金含量，有必要根据不同厚度的产品为保证其力学性能而确定。

高强度碳素结构钢

高强度碳素钢基本上都是碳-锰或碳-锰-硅钢，也有的牌号含有少量的其他合金添加元素。这类钢可以热轧状态使用或以热处理(正火或调质)状态使用。如表2.3-72所示，经调质的碳-锰钢板的屈服强度范围根据其截面厚度为315～550MPa(46～80ksi)。经调质的、屈服强度为345MPa(50ksi)的碳素钢在低至-68℃(-90℉)时，它的夏比V形缺口冲击吸收功可高达27～34J(20～25lbf·ft)。然而对于690MPa(100ksi)的调质碳素钢(表2.3-72)，其冲击吸收功在-60℃(-75℉)时降低到约20J(15lbf·ft)。所有的牌号钢都要经过用铝进行晶粒细化来提高其韧性。

表2.3-72　高强度结构钢的一般化学成分、拉伸性能和产品尺寸

技术规范和牌号或型号	产品形式	产品厚度①		熔炼分析成分②(质量分数,%)				屈服强度		抗拉强度		200mm(8in)长的伸长率(%)
		mm	in	碳	锰	硅	铜	MPa	ksi	MPa	ksi	
热轧的碳-锰钢												
ASTM A529	棒材、厚钢板和型材	13	½	0.27	1.20	—	0.20③	290	42	415～585	60～85	19
ASTM A612	厚钢板	13	½	0.25	1.00～1.35	0.15～0.40	0.35	345	50	570～725	83～165	16
		20	¾	0.25	1.00～1.35	0.15～0.40	0.35	345	50	560～695	81～101	16
		20～25	¾～1	0.25	1.00～1.50	0.15～0.50	0.35	345	50	560～695	81～101	16
ASTM A570，牌号45，50，55	薄钢板	6	0.230	0.25	1.35	—	0.20③	310～380	45～55	415～480	60～70	14～10
ASTM A662，牌号B	厚钢板	40	1½	0.19	0.85～1.50	0.15～0.40	—	275	40	450～585	65～85	20
ASTM A662，牌号C	厚钢板	40	1½	0.20	1.00～1.60	0.15～0.50	—	295	43	485～620	70～90	18
正火结构碳-锰钢												
ASTM A537，型号1	厚钢板	40	1½	0.24	0.70～1.35	0.15～0.50	0.35	345	50	485～620	70～90	18
	厚钢板	40～65	1½～2½	0.24	1.00～1.60	0.15～0.50	0.35	345	50	485～620	70～90	18
	厚钢板	65～100	2½～4	0.24	1.00～1.60	0.15～0.50	0.35	310	45	450～585	65～85	18

（续）

技术规范和牌号或型号	产品形式	产品厚度①		熔炼分析成分②（质量分数，%）				屈服强度		抗拉强度		200mm(8in)长的伸长率(%)
		mm	in	碳	锰	硅	铜	MPa	ksi	MPa	ksi	
正火结构碳-锰钢												
ASTM A612	厚钢板	与 ASTM A612 热轧条件一样，但是可以通过正火改善冲击韧性										
ASTM A633，牌号 A	厚钢板	100	4	0.18	1.00～1.35	0.15～0.50	—	290	42	430～570	63～83	18
ASTM A662，牌号 A	厚钢板	40～50	1½～2	0.14	0.90～1.35	0.15～0.40	—	275	40	400～540	58～78	20
ASTM A662，牌号 B	厚钢板	40～50	1½～2	0.19	0.85～1.50	0.15～0.40	—	275	40	450～585	65～85	20
ASTM A662，牌号 C	厚钢板	40～50	1½～2	0.20	1.00～1.60	0.15～0.50	—	295	43	485～620	70～90	18
ASTM A738，牌号 A	厚钢板	65④	2½④	0.24	1.50④	0.15～0.50	0.35	310	45	515～655	75～95	20⑤
ASTM A737，牌号 B	厚钢板	100	4	0.20	1.15～1.50	0.15～0.50	—	345	50	485～620	70～90	18
调质结构碳-锰钢												
SAE J368a，牌号 Q550	厚钢板	20	¼	0.20	1.35	—	—	550	80	655～795	95～115	18⑤
ASTM A537，型号 2	厚钢板	40	1½	0.24	0.70～1.35	0.15～0.50	0.35	415	60	550～690	80～100	22⑤
		40～65	1½～2½	0.24	1.00～1.60	0.15～0.50	0.35	415	60	550～690	80～100	22⑤
		65～100	2½～4	0.24	1.00～1.60	0.15～0.50	0.35	380	55	515～655	75～95	22⑤
		100～150	4～6	0.24	1.00～1.60	0.15～0.50	0.35	315	46	485～620	70～90	22⑤
ASTM A678，牌号 A	厚钢板	40	1½	0.16	0.90～1.50	0.15～0.50	0.20③	345	50	485～620	70～90	22⑤
ASTM A678，牌号 B	厚钢板	40	1½	0.20	0.70～1.35	0.15～0.50	0.20③	415	60	550～690	80～100	22⑤
		40～65	1½～2½	0.20	1.00～1.60	0.15～0.50	0.20③	415	60	550～690	80～100	22⑤
ASTM A678，牌号 C	厚钢板	20	¾	0.22	1.00～1.60	0.20～0.50	0.20③	515	75	655～790	95～115	19⑤
		20～40	¾～1½	0.22	1.00～1.60	0.20～0.50	0.20③	485	70	620～760	90～100	19⑤
		40～50	1½	0.22	1.00～1.60	0.20～0.50	0.20③	450	65	585～720	85～105	19⑤

（续）

技术规范和牌号或型号	产品形式	产品厚度①		熔炼分析成分②（质量分数,%）				屈服强度		抗拉强度		200mm(8in)长的伸长率(%)
		mm	in	碳	锰	硅	铜	MPa	ksi	MPa	ksi	
调质结构碳-锰钢												
ASTM A738，牌号B	厚钢板	65	2½	0.20	0.90～1.50	0.15～0.55	0.35	415	60	585～705	85～102	20⑤
ASTM A738，牌号C	厚钢板	65	2½	0.20	1.50	0.15～0.50	0.35	415	60	550～690	80～100	22⑤
		65～100	2½～4	0.20	1.62	0.15～0.50	0.35	380	55	515～655	75～95	22⑤
		100～150	4～6	0.20	1.62	0.15～0.50	0.35	315	46	485～620	70～90	20⑤

①产品厚度为最大值，除非另给出范围。 ②成分为最大值，除非另给出范围或者以脚注为规定。 ③如规定，含铜量为最小值。 ④超过65mm(2.5in)时，ASTM A738 牌号 A 应加入 1.65% Mn(最大值)进行调质处理，以达到特定的强度等级。 ⑤50mm(2in)长的伸长率。

除了高强度厚钢板的应用以外，调质碳-锰钢还可以用于轴类和联轴器类的零件。w(C)为0.40%～0.60%的钢可用于机车车轮、轮胎钢圈和车轴，含碳量再高则可作为高强度的钢丝、板簧材料应用，通常还要添加硅-锰或铬-钒合金元素。含碳量较高的钢材还可以应用于钢轨(w(C)为0.7%)，并且在含碳量范围(一般w(C)为0.20%～0.50%)内的均可作为增强棒材应用。

高强度低合金钢

HSLA钢或称微合金化钢能比普通碳素钢提供更好的力学性能和/或更高的耐大气腐蚀性。它们不属于通常意义上的合金钢，因为它们是按照满足规定的力学性能而不是化学成分进行开发生产的(HSLA钢的屈服强度高于275MPa或40ksi)。特定HSLA钢的化学成分按不同的产品厚度而异，以满足其力学性能的要求。为得到适当的成形性和焊接性，HSLA钢有低的含碳量(0.05%～接近0.25%)，其w(Mn)高至2.0%。少量的铬、镍、钒、铌、钛和锆分别以不同的组合加入使用。

高强度低合金钢主要被热轧成为常用的锻制品形式(薄钢板、带钢、棒材、厚钢板及结构型材)，而且一般都以轧制状态供货。然而热轧的HSLA产品的生产还包括使用特种热轧工艺，以此进一步改进HSLA钢的力学性能和产品形态。这些工艺方法包括：

- 析出强化的HSLA钢，通过控制轧制可以获得细化奥氏体晶粒和/或高度变形(扁平化)的奥氏体晶粒。在冷却过程中，这种奥氏体晶粒转变为细化的铁素体晶粒，从而在提高屈服强度的同时大大地增强其韧性。
- 控制轧制的HSLA钢，在奥氏体转化过程中最好再通过加速冷却来产生细化的铁素体晶粒。这种冷却速度既不能太快使之形成针状铁素体，也不能太慢，以致卷绕高温会造成析出物的过时效。
- 具有适当淬硬性的低碳钢(w(C)≤0.08%)，经过淬火或加速空冷或水冷后会转化为低碳贝氏体(针状铁素体)。这种显微组织能将高屈服强度(275～690MPa或60～100ksi)、优良的焊接性和成形性，以及高韧性最佳地综合在一起(要得到低的韧脆转变温度,控制轧制是必要的)。
- 含钒HSLA钢的正火处理。这种工艺能让晶粒的大小再细化，从而提高其韧性和屈服强度。
- HSLA钢的中间临界温度退火，以此可获得双相显微组织(马氏体在铁素体的基体上呈岛形散布)。这种显微组织具有较低的屈服强度，但是由于快速形变硬化能力为其提供了比传统的HSLA钢更好的塑性和抗拉强度的性能综合，而使成形性也得到改善。

这些旨在控制/强化HSLA性能的工艺方法的应用在第2篇第2章里进行了介绍。

除了热轧产品以外，HSLA钢还用于生产冷轧钢和锻件。HSLA钢锻件(作为热轧HSLA产品)的主要优点是其不需热处理就能获得275～485MPa(40～70ksi)的屈服强度或许更高。这些加入微量合金的铁素体-珠光体锻件的基本成分(质量分数)一般为

0.3%~0.5% C 和 1.4%~1.6% Mn。低碳贝氏体的 HSLA 钢锻件也已经开发出来。

HSLA 钢的种类。高强度低合金钢包括许多标准和专用的钢号，用于提供多种性能，如强度、韧性、成形性、焊接性和耐大气腐蚀的组合。这些钢并不被认为是合金钢，尽管采用少量的合金添加元素它们才获得所需要的性能。HSLA 钢被归为单独的钢种，它类似于通过添加少量合金、也许还有特殊的工艺技术(如控制轧制)而使性能得到增强的轧制中碳钢。HSLA 钢的这类产品的单独分类，也可以从其一般是按照碳素钢的基础价格进行定价得到反映。不仅如此，HSLA 钢常依照其最低力学性能出售，而其规定的合金含量却留给生产商自行决定。

HSLA 钢可以分成六类：

- *耐候钢*，含有少量的合金元素(如铜和磷)，用于提高其耐大气腐蚀能力和固溶强化的能力(见本章“在大气中的腐蚀”一节)。
- *添加微量合金的铁素体-珠光体钢*，里面含有非常少量(一般(质量分数)低于 0.01%)形成强碳化物或碳氮化物的合金元素，其形成的元素如铌、钒和/或钛，以此进行析出强化、晶粒细化，可能还有转变温度的控制。
- *轧制珠光体钢*，它包括碳-锰钢，还可以添加少量其他合金元素，用于提高强度、韧性、成形性和焊接性。
- *针状铁素体(低碳贝氏体)钢*，这是一种低碳钢(w(C)低于 0.08%)，具有高屈服强度、焊接性、成形性和韧性均佳的综合性能。
- *双相钢*，其显微组织为马氏体散布于珠光体的基体中，以此获得塑性和抗拉强度的优良综合性能。
- *夹杂物形态受控钢*，它通过少量添加钙、锆或钛、也许还有稀土元素，将硫化物杂质的形状从挤扁的长条形转变为小的、分散的及差不多为球状，从而获得改良的塑性和全厚度韧性。

上述种类并不是一种必要的鉴别分组方法，因为 HSLA 钢可以具有一组以上的特征性能。例如，所有上述种类的钢都可以进行夹杂物形态的控制。表 2.3-73 所列是一些典型的 HSLA 钢所能有的轧制形式及其相应的用途。表 2.3-74 和表 2.3-75 列出了在不同的 ASTM 技术规范中所包含的一些 HSLA 钢的化学成分和性能。

表 2.3-73 ASTM 技术规范的 HSLA 钢的特性及其用途一览表

ASTM 技术标准[①]	名　称	合金元素[②]	适用轧制形式	特殊性能	用　途
A242	高强度低合金结构钢	Cr，Cu，N，Ni，Si，Ti，V，Zr	厚度≤100mm(4in)的厚钢板、棒材和型材	四倍于碳素钢的耐大气腐蚀性	用于焊接，螺栓或铆接的结构中的构件上
A572	结构特性的高强度低合金铌-钒钢	Nb，V，N	厚度≤150mm(6in)的厚钢板、棒材、型材和薄钢板桩	六种牌号的屈服强度为 290~450MPa(42~65ksi)	焊接，螺栓或铆接的构件，但主要用于螺栓和铆接连接的桥梁和建筑上
A588	高强度低合金结构钢，最小屈服强度 345MPa(50ksi)，厚度≤100mm(4in)	Nb，V，Cr，Ni，Mo，Cu，Si，Ti，Zr	厚度≤200mm(8in)的厚钢板、棒材和型材	四倍于碳素钢的耐大气腐蚀性，九种牌号有相似强度	焊接，螺栓或铆接的构件，主要用于减轻重量和增加耐用度是很重要的焊接桥梁和建筑上
A606	薄钢板和带钢，热轧与冷轧，高强度低合金并经提高的耐腐蚀性	未作规定	热轧和冷轧薄钢板和带钢	二倍于碳素钢的耐大气腐蚀性(种类2)或四倍于碳素钢(种类4)	用于减轻重量和增加耐用度是很重要的结构及其他用途

（续）

ASTM 技术标准[①]	名　称	合金元素[②]	适用轧制形式	特殊性能	用　途
A607	薄钢板和带钢，热轧与冷轧的高强度低合金铌和/或钒钢	Nb，V，N，Cu	热轧和冷轧薄钢板和带钢	仅当规定有铜含量时，二倍于碳素钢的耐大气腐蚀性；六种牌号屈服强度为 310 ~ 485MPa(45 ~ 70ksi)	用于减轻重量和增加耐用度是很重要的结构及其他用途上
A618	热成形的焊接和无缝高强度低合金钢管材	Nb，V，Si，Cu	方形、矩形、圆形以及特殊形状的结构焊接和无缝钢管	三种牌号有相似的屈服强度，采购时可供货二倍于碳素钢的耐大气腐蚀性	一般性结构用途，包括焊接、螺栓和铆接的桥梁和建筑
A633	经正火高强度低合金结构钢	Nb，V，Cr，Ni，Mo，Cu，N，Si	厚度≤150mm(6in)的厚钢板，棒材和型材	增强型缺口冲击韧性，五种牌号屈服强度为 290 ~ 415MPa(42 ~ 60ksi)	用于温度高于 -45℃(-50℉)的焊接、螺栓或铆接的结构上
A656	热轧高强度低合金结构钢，钒-铝-氮钢和钛-铝钢	V，Al，N，Ti，Si	通常厚度≤16mm(⅝in)的厚钢板	屈服强度为 552MPa(80ksi)	用于需减轻重量的货车框架、支撑托架、起重机吊臂、机车车厢及其他用途上
A690	高强度低合金钢 H 桩和薄钢板桩	Ni，Cu，Si	结构特性的 H-钢桩和薄钢板桩	船用结构上的挡水部位，具有超过碳素钢二至三倍的耐腐蚀性	用于船坞墙面，海中隔墙，舱壁，疏通挖掘及其他暴露于海水中的类似结构上
A 709，牌号 50 和 50W	结构钢	V，Nb，N，Cr，Ni，Mo	厚度≤100mm(4in)的所有各类结构型材和厚钢板	最小屈服强度为 345MPa(50ksi)，牌号 50W 为时效钢	桥梁
A714	高强度低合金焊接钢管和无缝钢管	V，Ni，Cr，Mo，Cu，Nb	名义管径为 13 ~ 660mm(½ ~ 26in)的管道	最小屈服强度≤ 345MPa(50ksi)，二至四倍于碳素钢的耐腐蚀性	管道
A715	成形性经改进的热轧的高强度低合金薄钢板和带钢	Nb，V，Cr，Mo，N，Si，Ti，Zr，B	热轧薄钢板和带钢	相对于 A606 和 A607，经改进的成形性[③]，四种牌号的屈服强度为 345 ~ 550MPa(50 ~ 80ksi)	用于需要高强度、轻重量、改进的成形性以及较好焊接性均很重要的结构及其他用途上

（续）

ASTM技术标准①	名　称	合金元素②	适用轧制形式	特殊性能	用　途
A808	高强度低合金并经改进的缺口冲击韧性	V，Nb	厚度≤65mm(2⅝in)的热轧厚钢板	在－45℃(－50℉)温度下的夏比V形缺口冲击吸收功为40～60J(30～45lbf·ft)	铁路槽车
A812	高强度低合金钢	V，Nb	成卷的薄钢板	屈服强度为450～550MPa(65～85ksi)	焊接的分层压力容器
A841	形变热处理受控工艺生产的厚钢板	V，Nb，Cr，Mo，Ni	厚度≤100mm(4in)的厚钢板	屈服强度为310～345MPa(45～50ksi)	焊接的压力容器
A847	冷轧成形的高强度低合金焊接和无缝钢管，并经改进的耐大气腐蚀性	Cu，Cr，Ni，Si，V，Ti，Zr，Nb	最大周长为1625mm(64in)和壁厚为16mm(⅝in)的焊接管材，或最大周长为810mm(32in)和壁厚为13mm(½in)的无缝管材	最小屈服强度≤345MPa(50ksi)，及二倍于碳素钢的耐大气腐蚀性	圆形、方形或特殊形状的结构钢管材，用于桥梁和建筑的焊接，铆接和螺栓连接的结构上
A860	用可锻高强度低合金钢制成的高强度对接焊接头	Cu，Cr，Ni，Mo，V，Nb，Ti	正火或调质的锻制管接头	最小屈服强度≤485MPa(70ksi)	高压油、气输送管线
A871	具有耐大气腐蚀性的高强度低合金钢	V，Nb，Ti，Cu，Mo，Cr	厚度≤35mm(1⅜in)的轧制厚钢板	四倍于碳素结构钢的耐大气腐蚀性	管状结构和立柱

①牌号及力学性能见表2.3-75。　②除了碳、锰、磷和硫以外，所指的牌号还含有一种或多种的所列元素，但是并不必含有全部所列元素。规定的成分极限见表2.3-74。　③通过生产镇静钢得到，并利用晶粒细化工艺，且含有微量的合金元素成分，如铌、钒、钛、锆。

表2.3-74　ASTM技术规范的HSLA牌号钢的化学成分极值

ASTM技术规范①	型号或牌号	UNS代号	熔炼化学成分极值②(质量分数,%)									
			C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	V	其　他
A242	型号1	K11510	0.15	1.00	0.45	0.05	—	—	—	0.20min	—	—
A572	牌号42	—	0.21	U5③	0.04	0.05	0.30③	—	—	0.20min④	—	⑤
	牌号50	—	0.23	U5③	0.04	0.05	0.30③	—	—	0.20min④	—	⑤
	牌号60	—	0.26	U5③	0.04	0.05	0.30	—	—	0.20min④	—	⑤
	牌号65	—	0.23③	1.65③	0.04	0.05	0.30	—	—	0.20min④	—	⑤
A588	牌号A	K11430	0.10～0.19	0.90～1.25	0.04	0.05	0.15～0.30	0.40～0.65	—	0.25～0.40	0.02～0.10	—
	牌号B	K12043	0.20	0.75～1.25	0.04	0.05	0.15～0.30	0.40～0.70	0.25～0.50	0.20～0.40	0.01～0.10	—
	牌号C	K11538	0.15	0.80～1.35	0.04	0.05	0.15～0.30	0.30～0.50	0.25～0.50	0.20～0.50	0.01～0.10	—

（续）

ASTM 技术规范[1]	型号或牌号	UNS 代号	熔炼化学成分极值[2]（质量分数，%）									
			C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	V	其　他
A588	牌号 D	K11552	0.10 ~ 0.20	0.75 ~ 1.25	0.04	0.05	0.50 ~ 0.90	0.50 ~ 0.90	—	0.30	—	0.04Nb, 0.05 ~ 0.15Zr
	牌号 K	—	0.17	0.5 ~ 1.20	0.04	0.05	0.25 ~ 0.50	0.40 ~ 0.70	0.40	0.30 ~ 0.50	—	0.10Mo, 0.005 ~ 0.05Nb
A606	—	—	0.22	1.25	—	0.05	—	—	—	—	—	—
A607	牌号 45	—	0.22	1.35	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[4]	—	⑤
	牌号 50	—	0.23	1.35	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[4]	—	⑤
	牌号 55	—	0.25	1.35	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[4]	—	⑤
	牌号 60	—	0.26	1.50	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[4]	—	⑤
	牌号 65	—	0.26	1.50	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[4]	—	⑤
	牌号 70	—	0.26	1.65	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[4]	—	⑤
A618	牌号 Ia	—	0.15	1.00	0.15	0.05	—	—	—	0.20min	—	—
	牌号 Ib	—	0.20	1.35	0.04	0.05	—	—	—	0.20min[6]	—	—
	牌号 II	K12609	0.22	0.85 ~ 1.25	0.04	0.05	0.30	—	—	—	0.02min	—
	牌号 III	K12700	0.23	1.35	0.04	0.05	0.30	—	—	—	0.02min	0.005Nbmin[7]
A633	牌号 A	K01802	0.18	1.00 ~ 1.35	0.04	0.05	0.15 ~ 0.30	—	—	—	—	0.05Nb
	牌号 C	K12000	0.20	1.15 ~ 1.50	0.04	0.05	0.15 ~ 0.50	—	—	—	—	0.01 ~ 0.05Nb
	牌号 D	K02003	0.20	0.70 ~ 1.60[3]	0.04	0.05	0.15 ~ 0.50	0.25	0.25	0.35	—	0.08 M0
	牌号 E	K12202	0.22	1.15 ~ 1.50	0.04	0.05	0.15 ~ 0.50	—	—	—	0.04 ~ 0.11	0.01 ~ 0.05Nb[4], 0.01 ~ 0.03N
A656	型号 3	—	0.18	1.65	0.025	0.035	0.60	—	—	—	0.08	0.020N, 0.005 ~ 0.15Nb
	型号 7	—	0.18	1.65	0.025	0.035	0.60	—	—	—	0.005 ~ 0.15	0.020N, 0.005 ~ 0.10Nb
A690	—	K12249	0.22	0.60 ~ 0.90	0.08 ~ 0.15	0.05	0.10	—	0.40 ~ 0.75	0.50min	—	—
A709	牌号 50，型号 1	—	0.23	1.35	0.04	0.05	0.40	—		—	—	0.005 ~ 0.05Nb
	牌号 50，型号 2	—	0.23	1.35	0.04	0.05	0.40	—		—	0.01 ~ 0.15	—
	牌号 50，型号 3	—	0.23	1.35	0.04	0.05	0.40	—		—	⑧	0.05Nbmax
	牌号 50，型号 4	—	0.23	1.35	0.04	0.05	0.40	—		—	⑨	0.015Nmax

（续）

ASTM技术规范①	型号或牌号	UNS代号	熔炼化学成分极值②（质量分数,%）									
			C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	V	其他
A715	—	—	0.15	1.65	0.025	0.035	—	—		—	必要时加入	Ti，Nb按需加入
A808	—	—	0.12	1.65	0.04	最大0.05或0.010	0.15~0.50	—		—	0.10	0.02~0.10Nb，V+Nb=0.15max
A812	65	—	0.23	1.40	0.035	0.04	0.15~0.50⑩	—	—	—	V+Nb=0.02~0.15	0.05Nbmax
	80	—	0.23	1.50	0.035	0.04	0.15~0.50	0.35	—	—	V+Nb=0.02~0.15	0.05Nbmax
A841	—	—	0.20	⑪	0.030	0.030	0.15~0.50	0.25	0.25	0.35	0.06	0.08Mo，0.03Nb，0.02Al总量
A871	—	—	0.20	1.50	0.04	0.05	0.90	0.90	1.25	1.00	0.10	0.25Mo，0.15Zr，0.05Nb，0.05Ti

①有关特性及其用途见表2.3-73，力学性能见表2.3-75。　②若所列为单一数值则为最大值，除非另有注明。　③数值可变或有最小值，取决于产品尺寸或轧制形态。　④可供选择或另有规定。　⑤可按型号1（0.005－0.05Nb）、型号2(0.01-0.15V)、型号3(0.05Nbmax,加上0.02-0.15V)、或型号4(0.015Nmax,加上V≥4N)。　⑥如果铬和硅分别为0.50%最小，则铜不设最小值。　⑦可以全部或部分地替代V。　⑧铌加上钒，0.02%~0.15%。　⑨氮和钒的含量为0.015%（最大)，且钒与氮之比为4:1。　⑩这时指定为硅镇静钢。　⑪对于40mm(1.5in)的厚钢板，锰的含量为0.70%~1.35%，或当碳含量不超过0.47%时，可增至1.6%。对于厚度大于40mm(1.5in)时，ASTM A841规定锰含量为1.00%~1.6%。

表2.3-75　ASTM技术规范的HSLA牌号钢的抗拉强度

ASTM技术规范①	型号、牌号或条件	产品厚度②		最小抗拉强度③		最小屈服强度③		最小伸长率③(%)		弯曲半径③	
		mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	200mm (8in)	50mm (2in)	纵向	横向
A242	型号1	20	¾	480	70	345	50	18	—	—	—
		20~40	¾~1½	460	67	315	46	18	21	—	—
		40~100	1½~4	435	63	290	42	18	21	—	—
A572	牌号42	150	6	415	60	290	42	20	24	④	—
	牌号50	100	4	450	65	345	50	18	21	④	—
	牌号60	32	1¼	520	75	415	60	16	18	④	—
	牌号65	32	1¼	550	80	450	65	15	17	④	—

（续）

ASTM 技术规范[1]	型号、牌号或条件	产品厚度[2]		最小抗拉强度[3]		最小屈服强度[3]		最小伸长率[3]（%）		弯曲半径[3]	
		mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	200mm (8in)	50mm (2in)	纵向	横向
A588	牌号 A-K	100	4	485	70	345	50	18	21	④	—
		100～125	4～5	460	67	315	46	—	21	④	—
		125～200	5～8	435	63	290	42	—	21	④	—
A606	热轧	薄钢板		480	70	345	50	—	22	t	$2t$～$3t$
	热轧和退火或正火	薄钢板		450	65	310	45	—	22	t	$2t$～$3t$
	冷轧	薄钢板		450	65	310	45	—	22	t	$2t$～$3t$
A607	牌号 45	薄钢板		410	60	310	45	—	22～25	t	$1.5t$
	牌号 50	薄钢板		450	65	345	50	—	20～22	t	$1.5t$
	牌号 55	薄钢板		480	70	380	55	—	18～20	$1.5t$	$2t$
	牌号 60	薄钢板		520	75	415	60	—	16～18	$2t$	$3t$
	牌号 65	薄钢板		550	80	450	65	—	15～16	$2.5t$	$3.5t$
	牌号 70	薄钢板		590	85	485	70	—	14	$3t$	$4t$
A618	Ia，Ib，II	19	¾	485	70	345	50	19	22	t～$2t$	—
	Ia，Ib，II，III	19～38	¾～1½	460	67	315	46	18	22	t～$2t$	—
A633	A	100	4	430～570	63～83	290	42	18	23	④	—
	C，D	65	2½	485～620	70～90	345	50	18	23	④	—
	C，D	65～100	2½～4	450～590	65～85	315	46	18	23	④	—
	E	100	4	550～690	80～100	415	60	18	23	④	—
	E	100～150	4～6	515～655	75～95	380	55	18	23	④	—
A656	50	50	2	415	60	345	50	20	—	④	—
	60	40	1½	485	70	415	60	17	—	④	—
	70	25	1	550	80	485	70	14	—	④	—
	80	20	¾	620	90	550	80	12	—	④	—
A690	—	100	4	485	70	345	50	18	—	$2t$	—
A709	50	100	4	450	65	345	50	18	21	—	—
	50W	100	4	485	70	345	50	18	21	—	—
A715	牌号 50	薄钢板		415	60	345	50	—	22～24	0	t
	牌号 60	薄钢板		485	70	415	60	—	20～22	0	t
	牌号 70	薄钢板		550	80	485	70	—	18～20	t	$1.5t$
	牌号 80	薄钢板		620	90	550	80	—	16～18	t	$1.5t$
A808	—	40	1½	450	65	345	50	18	22	—	—
		40～50	1½～2	450	65	315	46	18	22	—	—
		50～65	2～2½	415	60	290	42	18	22	—	—
A812	65	薄钢板		585	85	450	65	—	13～15	—	—
	80	薄钢板		690	100	550	80	—	11～13	—	—

（续）

ASTM 技术规范①	型号、牌号或条件	产品厚度②		最小抗拉强度③		最小屈服强度③		最小伸长率③(%)		弯曲半径③	
		mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	200mm (8in)	50mm (2in)	纵向	横向
A841	—	65	2.5	485~620	70~90	345	50	18	22	—	—
		65~100	2.5~4	450~585	65~85	310	45	18	22	—	—
A871	60，热轧	5~35	3/16~1 3/8	520	75	415	60	16	18	—	—
	65，热轧	5~20	3/16~3/4	550	80	450	65	15	17	—	—

①有关特性及其用途见表2.3-73，有关规定的化学成分见表2.3-74。 ②除给定范围外，均指最大产品厚度；对于薄钢板，产品没有厚度规定。 ③可根据产品尺寸和轧制形态而变。 ④ASTM A6规定可供选择的补充要求。

经热处理的结构低合金牌号钢

经热处理的结构低合金牌号钢比碳素牌号钢具有更好的淬硬性，并且因此能为较厚型材同时提供高强度和高韧性。它们的合金含量能改善其耐热性和耐腐蚀性。然而，这些牌号的钢似乎更难以进行焊接，而且一般比碳素钢或HSLA钢还要昂贵。经调质的低合金牌号钢可用于满足ASTM A514或A517的要求。这种钢通过加热到至少900℃(1650℉)、水淬或油淬、然后在不低于600℃(1100℉)的温度回火，能根据其截面厚度形成回火马氏体或回火马氏体加上贝氏体的显微组织。

这一类的钢材里一般都含有(质量分数)低于0.25%的C和5%的合金元素。屈服强度值的范围从大约345~895MPa(50~130ksi)，这具体取决于化学成分、厚度和热处理。表2.3-76列出了调质低碳钢的最小抗拉强度要求。这种钢主要用于厚钢板，不过也有些用于生产锻件或铸件。

表2.3-76 调质低碳钢的最小抗拉强度及其最大厚钢板厚度

技术规范或通用代号	牌号、型号或级别	厚钢板厚度①		最小屈服强度		抗拉强度		50mm(2in)长的最小伸长率(%)
		mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	
ASTM A514或A517	A，B，C	32	1 1/4	690	100	760~895	110~130	18
	E，F	65	2 1/2	690	100	760~895	110~130	18
	E	65~150	2 1/2~6	620	90	690~895	100~130	16
ASTM A533	级别1(型号A,B,或C)	300	12	345	50	550~690	80~100	18
	级别2(型号A,B,或C)	300	12	485	70	620~795	90~115	16
	级别3(型号A,B,或C)	65	2	570	83	690~860	100~125	16
ASTM A543	B，C	②	②	485~585	70~85	620~930	90~135	14~16
ASTM A678	D	75	3	515	75	620~760	90~110	18
ASTM A709	70W	100	4	425	70	620~760	90~110	19
	100，100W	65	2	690	100	760~895	110~130	18
	100，100W	65~100	2 1/2~4	620	90	690~895	100~130	16

注：这些钢材的化学成分取自第1节(表2.1-29和表2.1-30)。

①当所示为单一数值时，则为按规定力学性能的最大厚钢板厚度。 ②ASTM A543并未规定最大厚钢板厚度，ASTM A543中的厚钢板适用于厚度要求为50mm(2in)及其以上的尺寸。

第10节 超高强度钢

超高强度钢的开发是为了结构方面的应用，并要承受非常高的载荷，而且常要求有高强度-重量比。此外，它们还必须有好的塑性和韧性。过去后者也用拉伸塑性即伸长率和断面收缩率表示，以及抗冲击性或在缺口试验中所吸收的能量。然而近年来，断裂韧度已经成为表示钢材的高性能在结构应用中可否被接受的一个重要指标。

超高强度钢的代号有一定的随意性，因为迄今还没有为其建立一种可被普遍接受的强度标准。另外，由于已经开发出越来越高的强度结构钢，故其适用的

强度范围也在逐渐增大。本节所介绍的工业用结构钢的最小屈服强度为1380MPa(200ksi)。

除了本节所讨论的钢材以外，许多其他相宜的和标准的钢材也能应用于几乎相同类型的用途，但是在强度等级上要略低于上述为超高强度类的结构钢所人为设定的1380MPa(200ksi)的屈服强度下限值。中合金钢，例如4330V和4335V(相应于SAE-AISI标准的改进型钒钢)也属于较为广泛应用的、屈服强度为1240~1380MPa(180~200ksi)的钢材范畴。某些适用的钢材如Hy Tuf钢(一种类似于300M的硅改进棒材)，在强度高达并略微超过1380MPa(200ksi)时还具有极佳的韧性。Hy Tuf的这种韧性与该强度范围内的马氏体时效钢的几乎一样。对于这里尚未涉及的钢及其强度范围的性能和其他数据资料读者可查询由巴特尔实验室(哥伦布斯,OH)的力学性能数据中心出版的《航天结构金属手册》以及生产厂家的产品说明书。

超高强度结构钢的种类是很广的，它包括许多不同的钢种。然而为了简化对这些合金的介绍，这里将其分为四种：

- 中碳低合金钢。
- 中合金空气硬化钢。
- 高断裂韧性钢。
- 马氏体时效钢。

除了这些钢的有关资料外，本手册(下册)第4篇第7章里还特别为其推荐了热处理方法。

中碳低合金钢

超高强度的中碳低合金钢家族包括SAE-AISI 4130、强度较高的4140和更深度淬火且更高强度的4340。目前又开发了几种在4340的基础上经过改进的钢种。其中一种改进型(300M)增加了硅的含量，是为了得到非常高的强度而要求将其在低温下回火以防止其发生脆化。在AMS 6434里，钒作为晶粒细化剂加入以提高其韧性，并稍微降低一些含碳量，以改善其焊接性。拉迪希(Ladish)D-6a含有晶粒细化剂钒以及比4340稍高的碳、铬和钼，而稍低的镍。其他应用广度差一些的但也属于该族的钢种有6150和8640。它们的化学成分如表2.3-77所示。下面给出了4340、300M和D-6a的性能数据。在本章第2节中，可以查到表2.3-77中所列的其他SAE-AISI牌号钢的性能。

表2.3-77　超高强度钢的化学成分

代号或商业名称[①]	化学成分[②](质量分数,%)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Cr
中碳低合金钢								
4130	0.28~0.33	0.40~0.60	020~0.35	0.80~1.10	—	0.15~0.25	—	—
4140	0.38~0.43	0.75~1.00	020~0.35	0.80~1.10	—	0.15~0.25	—	—
4340	0.38~0.43	0.60~0.80	020~0.35	0.70~0.90	1.65~2.00	0.20~0.30	—	—
AMS 6434	0.31~0.38	0.60~0.80	020~0.35	0.65~0.90	1.65~2.00	0.30~0.40	0.17~0.23	—
300M	0.40~0.46	0.65~0.90	1.45~1.80	0.70~0.95	1.65~2.00	0.30~0.45	0.05 最低	—
D-6a	0.42~0.48	0.60~0.90	0.15~0.30	0.90~1.20	0.40~0.70	0.90~1.10	0.05~0.10	—
6150	0.48~0.53	0.70~0.90	020~0.35	0.80~1.10	—	—	0.15~0.25	—
8640	0.38~0.43	0.75~1.00	020~0.35	0.40~0.60	0.40~0.70	0.15~0.25	—	—
中合金空气硬化钢								
H11mod	0.37~0.43	0.20~0.40	0.80~1.00	4.75~5.25	—	1.20~1.40	0.40~0.60	—
H13	0.32~0.45	0.20~0.50	0.80~1.20	4.75~5.50	—	1.10~1.75	0.80~1.20	—
高断裂韧性钢								
AF1410[③]	0.13~0.17	0.10 最高	0.10 最高	1.80~2.20	9.50~10.50	0.90~1.10	—	13.50~14.50
HP-9-4-30[④]	0.29~0.34	0.10~0.35	0.20 最高	0.90~1.10	7.0~8.0	0.90~1.10	0.06~0.12	4.25~4.75
AerMet 100	0.21~0.27	0.10 最高	0.10 最高	2.5~3.3	11.0~12.0	1.00~1.30	—	13.3~13.5

①本文所述的超高强度马氏体时效钢的化学成分列于表2.3-84。　②P和S的含量因炼钢工艺的不同而不同。通常这些钢中的含量分别不超过0.035%P和0.040%S。　③AF1410规定含有0.008%P和0.005%S。有些厂商所用的范围比较窄。　④HP-9-4-30规定含有0.10%P最高和0.10%S最高。有些厂商所用的范围比较窄。

近年来，在这一类的钢中，并没有增加新的或明显不同的商业用钢。开发方面主要着力于改进熔炼和处理技术，并使用较为严格的工艺控制和检验方法，用于提高塑性和韧性。通过使用熔化炉料作为原料和采用先进的冶炼技术，如真空碳脱氧、真空脱气、电渣重熔（ESR）、真空电弧重熔（VAR）和双真空熔化（真空感应熔化接着再真空电弧重熔或VIM/VAR），以此生产含有较少和较小非金属夹杂物的钢和较少内部和表面缺陷的轧制产品。用这些技术所生产的钢，其一炉与一炉的熔化和一批与一批的产品之间的性能差别较小，并有更高的塑性和韧性尤其是其横向，从而提高了使用的可靠性。

4340 钢

可以将SAE-AISI4340钢作为其他超高强度钢的比较标准。它将深度淬硬性与高塑性、韧性和强度结合起来。它还有高的耐疲劳性和耐蠕变性。它常被应用于严酷的使用条件和需要高强度的大型型材。对于较小截面的钢材采用空气硬化，实际上也常用油淬，特别是它能防止产生回火脆化。在高温下它也不容易被软化，即它有一种很好的强度保持性。当将4340钢热处理达到抗拉强度为1400MPa（200ksi）以上时，氢脆将成为一个问题。零件在进行酸洗或镀层的过程中若暴露在氢气里，则应随即进行烘烤。当这种钢经回火抗拉强度达到1500～1950MPa（220～280ksi）时，其抗应力-腐蚀开裂的能力特别差。但它容易进行氮化，并常以此提高其疲劳寿命。

工艺。4340钢通常在1065～1230℃（1950至2250℉）的温度里进行锻造，锻造后零件在干燥处空冷，或者最好是炉冷。4340冷拉材料的切削加工性的评价值为55%，对于其退火材料的切削加工性的评价值为45%（以冷轧B1112的为100%）。最好通过正火形成部分球化组织，然后以650℃（1200℉）回火获得最佳切削加工性。4340钢具有很好的焊接特性，它易于进行气焊或电弧焊，但是应该使用成分相同的焊条。因为4340钢是用空气硬化的，故其焊接件应当在焊接后很快进行退火或者正火和回火。

产品形式和应用。4340钢广泛地适用于方钢、棒材、圆钢、锻件、薄钢板、管材以及焊丝。它也可以生产成轻棒材板和铸件。典型的应用包括螺栓、螺钉和其他紧固件，齿轮、齿轴、轴以及类似机器零件，发动机里的曲轴和连杆和飞机上的起落架以及其他关键结构件。

性能。通过油淬可以让4340钢淬透，对于圆截面直径可达75mm（3in），水淬截面更大（达到其淬硬性的极值）。表2.3-78所列的是4340钢油淬的一般力学性能。

表2.3-78　4340钢的一般力学性能

回火温度		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度		夏比V形缺口冲击吸收功	
℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			HB	HRC	J	lbf·ft
205	400	1980	201	1860	270	11	39	520	53	20	15
315	600	1760	255	1620	235	12	44	490	49.5	14	10
425	800	1500	217	1365	198	14	48	440	46	16	12
540	1000	1240	180	1160	168	17	53	360	39	47	35
650	1200	1020	148	860	125	20	60	290	31	100	74
705	1300	860	125	740	108	23	63	250	24	102	75

注：845℃（1550℉）油淬，并以不同温度回火。

300M 钢

300M合金钢基本上是一种4340钢的硅（w(Si)为1.6%）改善棒材，但是其含碳量和含钼量稍微高一些，还含有钒。这种钢表现出深度的淬硬性，并当抗拉强度为1860～2070MPa（270～300ksi）时具有塑性和韧性。除了由于含硅量的增加使之加深淬硬性、增强固溶强化能力以及有较好的抗高温下软化性外，这种钢的许多性能都与4340钢相似。与相同强度的4340钢比，300M钢能够在较高的温度下回火，用于消除淬火应力。所谓的260℃（500℉）脆化被提高到较高的温度。因为高的硅含量和钼含量，故300M特别易于脱碳。在热态的处理过程中，要特别注意防止发生脱碳，或在处理之后应该能将脱碳层去除。当通

过热处理将材料强化到高于1380MPa(200ksi)的强度时，300M对氢脆变得很敏感。如果钢材在涂层之后进行烘干，那么其性能便得到改善并优于同等强度的4340或D-6ac钢。

工艺。300M钢可以在1065~1095℃(1950~2000℉)的温度里进行锻造。锻造不能在925℃(1700℉)的温度以下连续进行。锻造以后建议将零件放在炉子里缓慢冷却，但也可以置于干燥处空冷。尽管300M易于进行气焊或电弧焊，但是一般不建议进行焊接，应当使用成分相同的焊条。因为300M是空气硬化钢，故零件应当在焊接后进行退火或正火加回火。经退火300M钢的切削加工性的评价值为大约45%(以B1112的为100%)。正火后再经过650~675℃(1200~1250℉)的回火，可使材料具有部分球化组织并获得最佳切削加工性。

产品形式和应用。300M钢的典型用途是作为棒材、薄钢板、厚钢板、线材、管材、锻件和铸件，应用于飞机起落架、飞机火箭的机架零件、紧固件以及压力容器。

性能。表2.3-79列出了300M钢以不同的回火温度所获得的硬度和力学性能。

表2.3-79 300M钢的一般力学性能

回火温度		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功		硬度HRC
℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft	
90	200	2340	340	1240	180	6.0	10.0	17.6	13.0	56.0
205	400	2140	310	1650	240	7.0	27.0	21.7	16.0	54.5
260	500	2050	297	1670	242	8.0	32.0	24.4	18.0	54.0
315	600	1990	289	1690	245	9.5	34.0	29.8	22.0	53.0
370	700	1930	280	1620	235	9.0	32.0	23.7	17.5	51.0
425	800	1790	260	1480	215	8.5	23.0	13.6	10.0	45.5

注：圆棒，直径25mm(1in)，860℃(1575℉)油淬，并以不同的温度回火。

D-6a和D-6ac钢

拉迪希D-6a是一种低合金超高强度钢，开发其用于飞机和导弹的结构用途，主要是为了室温下抗拉强度1800~2000MPa(260~290ksi)的应用。D-6a钢在其抗拉强度高至1930MPa(280ksi)时，都能保持非常高的屈服强度与抗拉强度比，并伴随有好的塑性。它还有好的缺口韧性，以此承受高冲击载荷。它比4340有更深的淬硬性，却没有回火脆性，它还能保持高温下的高强度。它对于应力-腐蚀开裂以及在潮湿条件下腐蚀疲劳的敏感性与在相同的强度水平上的300M钢比较不相上下。在电炉里空气熔炼生产的合金叫做D-6a，在空气里熔炼后继之以真空电弧重熔而生产的合金则叫做D-6ac。由于冶炼工艺上的不同，D-6a和D-6ac钢的力学性能也有些差异。这两种钢的其他特性包括工艺特性是一样的。

工艺。D-6a进行锻造时，应该将其加热至最高温度1230℃(2250℉)，而且锻造应在980℃(1800℉)以上结束。锻件在锻造结束后还应缓慢冷却，可以在炉子里冷却或在适当的绝缘介质如炉灰或石灰中冷却。为获得最佳切削加工性，零件在锻造后应当立即装入650℃(1200℉)的炉内并保温12h，再升温到900℃(1650℉)并保持一段时间，时间长短取决于截面的大小，然后零件应冷却到650℃(1200℉)保持10h，最后空冷到室温。

D-6a材料即使为大型棒材也能焊接，只要使用中碳钢、高淬硬性合金钢所常用的焊接技术和控制方法。焊条要用相同化学成分的。

退火D-6a的切削加工性的评价值为50%~55%(以冷轧B1112的为100%)。当钢材要进行深度的冷压成形时，一般要先正火，然后在变形加工前进行球化处理。

产品形式和应用。D-6a和D-6ac都可以加工成棒材、圆钢、方钢及锻件，还能制成平轧产品(薄钢板和厚钢板)。这些产品形式可应用于起落架和关键的结构件，如飞机、固体燃料火箭的发动机壳体、轴类、齿轮、弹簧、模具、模板和垫板。

性能。表2.3-80所列是经热处理的D-6a钢的一般力学性能。

表2.3-80　D-6a钢棒的一般力学性能

回火温度		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功	
℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft
150	300	2060	299	1450	211	8.5	19.0	14	10
205	400	2000	290	1620	235	8.9	25.7	15	11
315	600	1840	267	1700	247	8.1	30.0	16	12
425	800	1630	236	1570	228	9.6	36.8	16	12
540	1000	1450	210	1410	204	13.0	45.5	26	19
650	1200	1030	150	970	141	18.4	60.8	41	30

注：900℃（1650℉）正火，845℃（1550℉）油淬，并以不同温度回火。

中合金空气硬化钢

本章所讨论的超高强度钢H11改进型（H11 mod）和H13就是一般所称的5% Cr（质量分数）热形变加工模具钢。它们除了多用于模具外，还被广泛地应用于结构用途，但是现在已不如过去用得多了，主要是因为又开发了其他几种钢材，虽然成本相似，但是在相似的强度条件下，其断裂韧度却大大增强了。不仅如此，H11改进型和H13还拥有一些非常优良的性质。它们的大型型材都能通过空气冷却整体淬火。这些钢的化学成分如表2.3-76所示。

H11改进型

这是一种改进型的马氏体热形变加工模具钢AISI H11的改进棒材，两者的主要差别在于含碳量略有提高。H11改进棒材经热处理强度可超过2070MPa（3000ksi）。正因它可以用空气硬化，才使其淬火后的残余应力为最小。由于H11改进型是一种二次淬火钢，它在510℃（950℉）以上的温度回火可获得最佳性能。用于这种钢的高回火温度可以在相当程度上消除应力，并让其性能稳定化，从而使材料具有高温下的优越性。

工艺。H11改进型易于在1120～1150℃（2050～2100℉）的温度里进行锻造。最好先将毛坯预热到790～815℃（1450～1500℉），然后均匀加热到锻造温度。到了925℃（1700℉）以下，锻造就不应继续下去了。如有必要，毛坯常可以再次加热。由于H11改进型是空气硬化，故必须在锻造后缓慢冷却，以防止发生应力裂纹。锻造后应当将其装进790℃（1450℉）的炉内，进行等温处理直至温度均匀，然后缓慢冷却，这时可以保留在炉里，或埋在绝热介质，如石灰、云母或像硅藻土之类的硅酸盐填埋材料里。等锻件冷却后，还应进行退火。

H11改进型即使是大型型材也易于焊接。一般熔焊都要伴之以惰性气体工艺或镀层电极。作为焊条金属应该有相同的化学成分。H11改进型的切削加工性的评价值约为1% C（质量分数）钢的60%，或约为B1112的45%。

产品形式和应用。H11改进型能作为棒材、方钢、圆钢、线材、厚钢板、薄钢板、带钢、锻件和挤压件。这些材料用于制造要求高强度，并同时能在高温下保持其强度的零件或具有中等耐腐蚀能力的零件。其典型的用途包括飞机起落架零件、飞行器机体零件、蒸汽或燃气轮机的内部零件、紧固件、弹簧以及热形变加工模具。

性能。表2.3-81所示是H11改进型经热处理后的纵向力学性能。

表2.3-81　H11改进型的纵向力学性能

回火温度		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功		硬度
℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft	HRC
510	950	2120	308	1710	248	5.9	29.5	13.6	10.0	56.5
540	1000	2005	291	1675	243	9.6	30.6	21.0	15.5	56.0
565	1050	1855	269	1565	227	11.0	34.5	26.4	19.5	52.0
595	1100	1540	223	1320	192	13.1	39.3	31.2	23.0	45.0
650	1200	1060	154	855	124	14.1	41.2	40.0	29.5	33.0
705	1300	940	136	700	101	16.4	42.2	90.6	66.8	29.0

注：从1010℃（1850℉）开始空气冷却，二次回火，在所示温度2+2h。

H13 钢

AISI H13 是一种化学成分、热处理和许多性质都与 H11 改进棒材相似的5% Cr(质量分数)的超高强度钢。两者的主要差别在于 H13 的较高含钒量(表 2.3-76),以此导致硬碳化钒的进一步更大扩散,使其具有较高的耐磨性。

像 H11 改进型一样,H13 也是二次淬火钢。它具有很好的耐回火性,能在高温下保持高的硬度和强度。它也可被深度淬火,故大型型材也可以通过空气冷却得以硬化。H13 经热处理强度能达到 2070MPa (300ksi)以上,如同 H11 改进型一样,它也具有很好的塑性和冲击强度。H13 的工艺流程与上面所述的 H11 改进型几乎相同。

高断裂韧性钢

本节所介绍的高强度、高断裂韧性钢,也就是屈服强度为 1380MPa(200ksi)和 K_{1c} 值为 100 MPa · $m^{1/2}$(91ksi · $in^{1/2}$)的工业用结构钢,这种钢还具有抗应力-腐蚀开裂的性能。

这里介绍三种这样的钢:HP-9-4-30、AF1410 和爱尔梅特(AerMet)100,它们都是 Ni-Co-Fe 型的合金钢,而且都有许多相似的特征。它们都是可焊接的,全都要求最低真空电弧熔化,并控制残余元素的含量至最低,以此获得最高韧性。

HP-9-4-30 钢

20 世纪 60 年代,大众钢铁公司(Republic Steel Corporation)推出一族四种可焊接钢,当热处理到中/高强度的水平时,它们都具有高断裂韧性。但是其中只有 HP-9-4-30 钢被投入相当大量的生产,也是本节所提及的所有的钢种中属于既有高强度又有高断裂韧性的钢材。其化学成分如表 2.3-76 所示。HP-9-4-30 钢通常用电弧炉熔炼后再用真空电弧重熔而成。其锻造温度不得超过 1120℃(2050℉)。HP-9-4-30 钢的力学性能可以达到抗拉强度为 1520~1650MPa(220~240ksi)和普通应变断裂韧度为 100MPa · $m^{1/2}$(91ksi · $in^{1/2}$)。这种钢还具有很深的淬硬性,经充分的淬火,马氏体的厚度达 150mm(6in)。在热处理的条件下,HP-9-4-30 钢可以进行弯曲、轧制或强力旋压等成形加工。经过热处理的零件也可进行焊接。惰性气体保护钨极电弧焊是其首先推荐的焊接工艺,而且既不需焊后加热也不需焊后热处理。零件焊接以后,可在 540℃(1000℉)的温度中保温 24h 消除应力。这是一种消除应力的处理,不会对焊缝金属或基体金属的强度或韧性产生负面影响。HP-9-4-30 钢可用于方钢、棒材、圆钢、厚钢板、薄钢板和带钢。它被应用于飞机结构零件、压力容器、金属成形加工设备的转轴、落锤杆以及高强度吸震的汽车零件。

性能。表 2.3-82 所示是用三种不同的温度进行二次回火处理的 HP-9-4-30 钢的室温力学性能。

表 2.3-82 HP-9-4-30 钢的室温力学性能

力学性能	在下列硬度的一般性能值		
	49~53HRC①	44~48HRC②	最小值③
抗拉强度/MPa(ksi)	1650~1790 (240~260)	1520~1650(220~240)	1520(220)
屈服强度/MPa (ksi)	1380~1450 (200~210)	1310~1380(190~200)	1310(190)
计量长度为 4*D* 的伸长率(%)	8~12	12~16	10
断面收缩率(%)	25~35	35~50	35
夏比 V 形缺口冲击吸收功 /J(lbf · ft)	20~27 (15~20)	24~34 (18~25)	24 (18)
断裂韧度(K_{1c}), /[MPa · $m^{1/2}$(ksi · $in^{1/2}$)]	66~99 (60~90)	99~115 (90-105)	—

①油淬从 845℃(1550℉)开始,到 -73℃(-100℉)冷冻,并在 205℃(400℉)下二次回火。 ②同①的热处理,但二次回火温度为 550℃(1025℉)。 ③对于型材锻至截面厚度为 75mm(3in)以下(或整个横截面小于 0.015m^2 或 25in^2)时,淬火至马氏体,二次回火温度为 540℃(1000℉)。

AF1410 钢

AF1410 钢是由美国空军资助的为研制先进潜艇船体用钢而开发的产品,是在低碳的 Fe-Ni-Co 型合金的基础上开发的产品。这种合金具有突出的抗应力-腐蚀开裂性能。通过增加钴和碳的含量,其抗拉强

度一般可以提高到1615MPa(235ksi)。这种强度上的提高是在使K_{Ic}值保持在154MPa·$m^{1/2}$(140ksi·$in^{1/2}$)的基础上实现的。这种强度和韧性的结合是其他工业用钢材所无法比拟的，而且其合金还可作为某些飞机零件里的钛的代用品。AF1410材料(化学成分见表2.3-76)空气可淬透的截面厚度达75mm(3in)。目前推荐的熔化工艺为真空感应熔化，然后再用真空电弧重熔(VIM/VAR)，然而早先是用VIM和VIM/ESR工艺。熔化工艺要求杂质元素必须维持在非常低的水平上，以保证其高断裂韧度。虽然可锻性温度可达1120℃(2050℉)，但至少40%的减缩应在900℃(1650℉)以下才能得到最佳性能。使用一种连续波(CW)-钨极气体保护电弧焊(GTAW)工艺能有好的焊接性能，但是要使用高纯度的金属丝并防止氧气污染。AF1410可以作为方钢、棒材、圆钢、厚钢板、薄钢板和带钢应用于飞机结构零件。

性能。AF1410的不同淬火介质对拉伸性能、冲击吸收功和断裂韧度的影响如表2.3-83所示。

表2.3-83 以不同介质淬火的AF1410钢力学性能

淬火介质	抗拉强度极限		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功		平面应力断裂韧度(K_{Ic})	
	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
空气	1680	244	1475	214	16	69	69	51	174	158
油	1750	254	1545	224	16	69	65	48	154	140
水	1710	248	1570	228	16	70	65	48	160	146

注：试件为50mm(2in)厚钢板，VIM/VAR熔炼，热处理规范：675℃(1250℉)8h空冷，900℃(1650℉)1h，淬火，830℃(1525℉)1h，淬火，-73℃(-100℉)冷冻1h，510℃(950℉)5h，最后空冷。

爱尔梅特(AerMet)100钢

爱尔梅特(AerMet)100钢是一种最新开发的应用于航空航天工业的高强度镍-钴钢。它只能用VIM/VAR的工艺熔炼生产得到。它的化学成分如表2.3-76所示，并经热处理达到1930~2070MPa(280~300ksi)的抗拉强度，并且在1930MPa(280ksi)时，断裂韧度超过110MPa$\sqrt{m}$(100ksi$\sqrt{in}$)。此外，它还具有远超过其他钢材的抗应力-腐蚀开裂和疲劳的性能。像其他超高强度的中碳钢一样，爱尔梅特(AerMet)100钢会遭受脱碳，其热处理应当在中性的气氛炉、盐浴或真空中进行。爱尔梅特(AerMet)100钢可以制成实心棒材、空心棒材、线材、带钢、方钢、薄钢板和厚钢板。这些产品形式可以应用于起落架零件、抓斗、弹射器、紧固件、结构件、装甲、起动器、军械、受冲击部件、喷气发动机主轴、传动轴、直升机立轴和锁环。

性能。爱尔梅特(AerMet)100的一般性能如表2.3-84所示。

表2.3-84 爱尔梅特(AerMet)100的一般力学性能

屈服强度		抗拉强度极限		伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功		断裂韧度(K_{Ic})	
MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
纵向									
1724	250	1965	285	14	65	41	30	126	115
横向									
1724	250	1965	285	13	55	34	25	110	100

注：885℃(1625℉)固溶处理1h，空冷，-73℃(-100℉)冷冻1h，并在480℃(900℉)时效5h。

马氏体时效钢

马氏体时效钢属于一种特殊的超高强度钢，它与传统钢的不同之处在于它们通过没有碳参与的金属反应实现其硬化，这种钢是通过在大约480℃(900℉)温度下的金属间化合物析出而得到强化。其名词就是取意于马氏体时效硬化，并表示为一种低碳、铁-镍板条形的马氏体基体的时效硬化。

工业用马氏体时效钢具有1030~2420MPa(150~350ksi)的屈服强度。某些试验性的马氏体时效钢的屈服强度可高达3450 MPa(500ksi)。这些钢一般都有非常高的镍、钴和钼的含量以及非常低的碳的含量。

事实上，在这些钢中碳是一种杂质，并且为了使碳化钛(TiC)的形成达到最低限度，只要工艺上可能就要尽量降低碳的含量，因为碳化钛会对于强度、塑性和韧性产生不利的影响。

物理冶金学

马氏体时效钢可以认为是一种高合金低碳、铁-镍板条马氏体。这种钢的相变可以借助于图2.3-33所示的双相图予以解释，它画出了Fe-Ni双相系统中的富铁端。图2.3-33a所示是冷却过程中从奥氏体转变为马氏体和在加热过程中从马氏体转变为奥氏体的逆向变化的亚稳态图形。图2.3-33b所示平衡图表示的是较高镍含量的平衡相在低温下为奥氏体和铁素体。

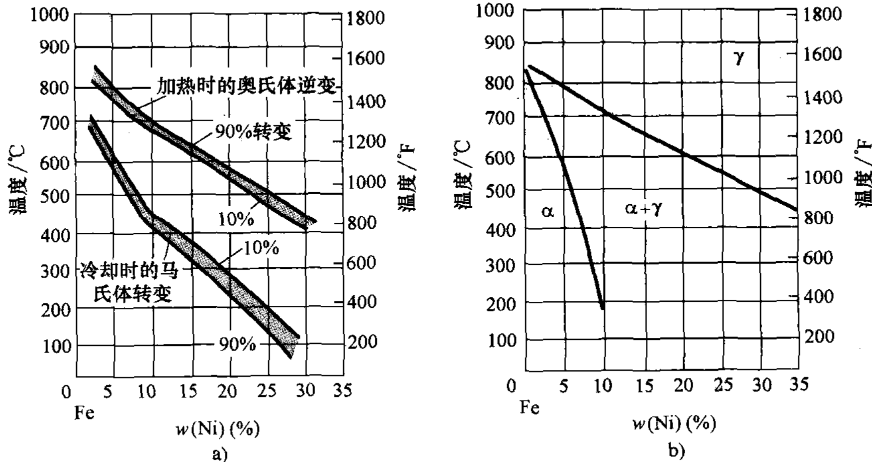


图2.3-33　铁-镍系统中相的关系
a）亚稳态　b）平衡

马氏体时效钢的时效硬化是经过在455～510℃(850～950℉)的温度内进行3～9h的热处理而形成的。在该处理过程中，发生的冶金学反应可以用平衡相图(见图2.3-33b)进行解释。

工业用合金

表2.3-85所列是较为普通的一些牌号的马氏体时效钢的化学成分。命名这些钢种所用牌号的括号中表示的是其名义屈服强度(单位为ksi)。故如18Ni(200)钢，是指在正常情况下硬化到屈服强度1380MPa(200ksi)。表2.3-84中的前三种钢——18Ni(200)、18Ni(250)和18Ni(300)，是最广泛和最易于获得的牌号钢。牌号18Ni(350)是一种超高强度的变型，生产有限仅用于特殊用途。18Ni(350)有两种生产成分钢(表2.3-85脚注)。还专门开发了18Ni(铸造)钢作为铸造成分的牌号。

表2.3-85　工业用马氏体时效钢的名义化学成分

牌　号	化学成分①(质量分数,%)					
	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Nb
标准牌号						
18Ni(200)	18	3.3	8.5	0.2	0.1	—
18Ni(250)	18	5.0	8.5	0.4	0.1	—
18Ni(300)	18	5.0	9.0	0.7	0.1	—
18Ni(350)	18	4.2②	12.5	1.6	0.1	—
18Ni(铸造)	17	4.6	10.0	0.3	0.1	—
12-5-3(180)③	12	3	—	0.2	0.3	—
无钴和低含量钴的牌号						
无钴18Ni(200)	18.5	3.0	—	0.7	0.1	—
无钴18Ni(250)	18.5	3.0	—	1.4	0.1	—

（续）

牌号	化学成分①（质量分数，%）					
	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Nb
无钴和低含量钴的牌号						
低钴 18Ni(250)	18.5	2.6	2.0	1.2	0.1	0.1
无钴 18Ni(300)	18.5	4.0	—	1.85	0.1	—

①所有的牌号含碳量不超过0.03%。 ②有些厂商使用4.8%Mo和1.4%Ti，名义值。 ③含有5%Cr。

近年来还开发成功许多不含钴的马氏体时效钢和含低钴的马氏体时效钢。促使这些特殊合金的开发是因为钴的短缺和由此导致的20世纪70年代后期到80年代早期，钴价格的逐步上升。这些合金的成分也列于表2.3-85。

工艺

熔化。大部分牌号的马氏体时效钢都是空气熔化再真空电弧重熔，或者真空感应熔化再真空电弧重熔。应用于航空航天关键用途上的优质牌号的马氏体时效钢，由于要求将残留元素（碳、锰、硫和磷）及气体（O_2、N_2 和 H_2）的含量降至最低限度，则需要经过空气、真空感应和真空电弧重熔的三次熔化。

热形变加工。马氏体时效钢可以采用传统的轧钢技术进行热形变加工，尽管对于若干独有的特征必须制定其允差。高含钛量的钢具有比一般的钢更高的热强度，并且要求较高的热形变加工负载或较高的加工温度。应当避免在高于1260℃（2300℉）的温度下加工。

表2.3-86 18Ni马氏体时效钢的热处理和典型的力学性能

牌号	热处理①	抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率（%）	断面收缩率（%）	断裂韧度(K_{Ic})	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa·m$^{1/2}$	ksi·in$^{1/2}$
18Ni(200)	A	1500	218	1400	203	10	60	155~240	140~220
18Ni(250)	A	1800	260	1700	247	8	55	120	110
18Ni(300)	A	2050	297	2000	290	7	40	80	73
18Ni(350)	B	2450	355	2400	348	6	25	35~50	32~45
18Ni(铸造)	C	1750	255	1650	240	8	35	105	95

①处理A：820℃（1500℉）固溶化处理1h，再在480℃（900℉）时效3h；处理B：820℃（1500℉）固溶化处理1h，再在480℃（900℉）时效12h；处理C：1150℃（2100℉）退火1h，595℃（1100℉）时效1h，820℃（1500℉）固溶化处理1h，再在480℃（900℉）时效3小时。

冷形变加工。当马氏体时效钢处于固溶退火（未经时效或相转变后的）的状态时，可以用所有的传统技术进行冷形变加工。它们有非常低的加工硬化率，并且能经受很大的压缩（>50%），而其硬度仅略有增加。

切削加工。马氏体时效钢在固溶退火或时效硬化的条件下，可以采用任何传统的方法进行切削。与具有同样硬度的传统钢材相比，马氏体时效钢一般有一样甚至更好的切削性能。

焊接。所有传统的焊接工艺都适用于连接马氏体时效钢。然而大部分的生产都采用惰性气体保护焊的工艺。而且要使用成分相匹配的焊条金属。

力学性能

表2.3-86所列是常见的马氏体时效钢牌号典型的拉伸性能和断裂韧度。与传统钢材相比，马氏体时效钢的一个突出特点就是其超韧性。图2.3-34所示就是将几种马氏体时效钢作为其抗拉强度的函数的 K_{Ic} 值与经淬火和回火的合金钢进行的比较。马氏体时效钢的韧性对于其纯净度是很敏感的，而且特别应当将碳和硫控制在低水平上，才能获得最佳断裂韧度。

超高强度钢的可比性数据

为特定用途选择超高强度钢要取决于许多因素。它们不仅包括强度和韧性，还受制于环境方面的要求如温度和腐蚀或抗应力-腐蚀开裂的能力。除此之外，对于一种钢的最终选择，其商业可行性的因数和价格也是很重要的。

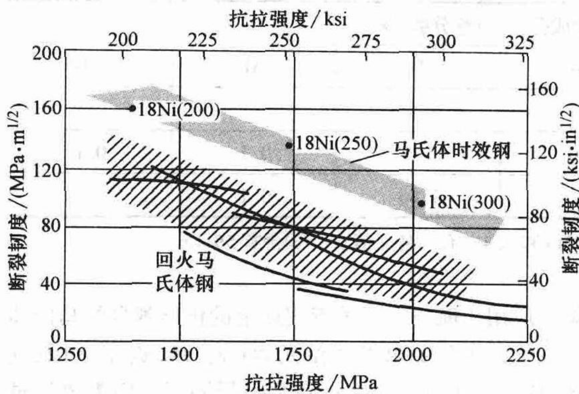


图2.3-34　马氏体时效钢的平面应变断裂韧度作为抗拉强度的函数与几种超高强度钢的断裂韧度相比

为了帮助设计者选择最佳超高强度钢的牌号，可以从本节所介绍的四类钢的比较中得出一些数据。图2.3-35和图2.3-36所示就是这些可比较的数据例子。有关标准和生产商推荐了所采用的热处理。如这些数据所示，与高断裂韧性钢和马氏体时效钢相比，一些老的、较为成熟的中碳低合金钢和中合金空气硬化钢也都有足以与之相比的屈服强度。然而，镍-钴钢和马氏体时效钢具有高得多的韧性和抗应力-腐蚀开裂性(见图2.3-35和图2.3-36中未出示)。然而，这些更高的合金钢也更为昂贵，并且其应用性有时也要受到限制。

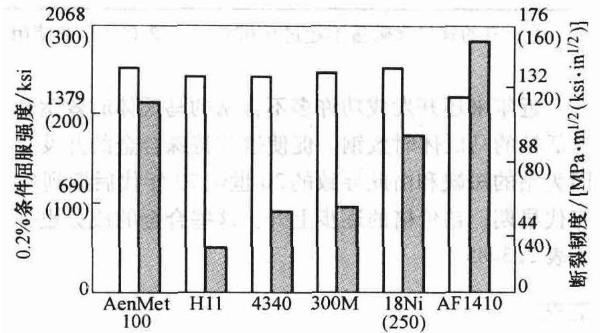
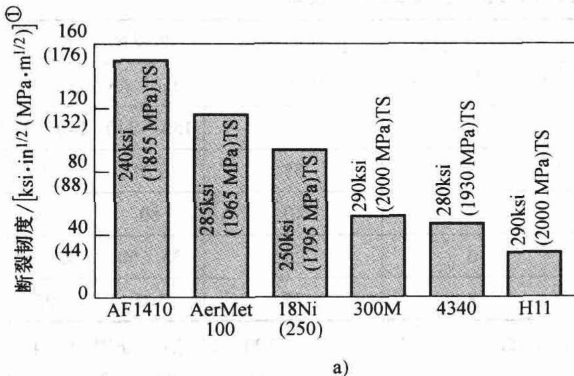
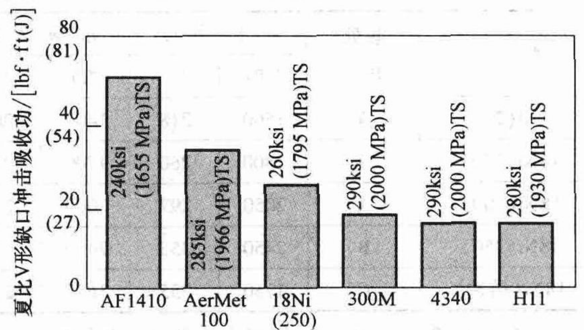
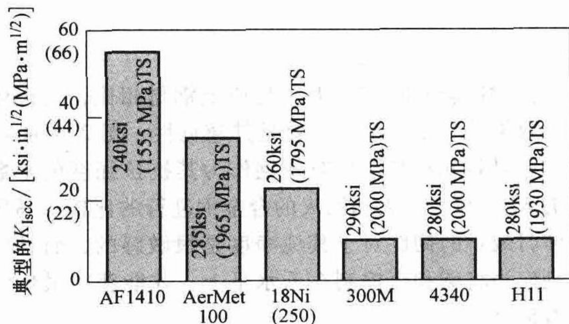


图2.3-35　超高强度钢的屈服强度和断裂韧度(带阴影的方图)数据







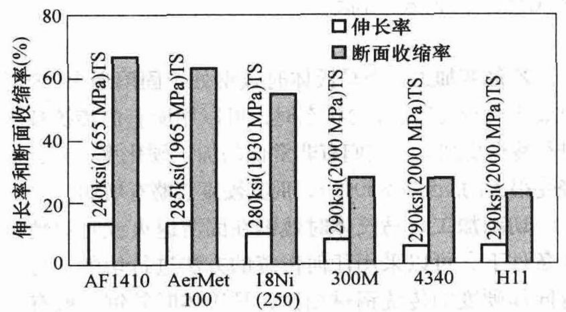


图2.3-36　超高强度钢的性能比较

a) 断裂韧度数据　b) 夏比V形缺口数据　c) 应力-腐蚀的应力强度开裂门槛值数据，K_{Iscc}　d) 延伸性数据

① 原书为 ksi $\sqrt{m}$(MPa $\sqrt{in}$)，疑有误，故改为 ksi · $in^{1/2}$(MPa · $m^{1/2}$)。——译者注。

第11节　耐磨奥氏体锰钢

最早的奥氏体锰钢含有(质量分数)大约1.2%C和12%Mn，是由罗伯特·海德菲尔德爵士(Sie Robert Hadfiekd)于1882发明的。海德菲尔德钢的独特之处在于它将高韧性、塑性与高的加工硬化能力结合在一起，通常还有很好的耐磨性。于是，作为一种非常有用的工程材料很快为大家所接受。

如今，海德菲尔德的奥氏体锰钢还在扩大其应用，而在成分和热处理方面只有很少的改进，主要应用于推土机、采矿、采石、石油钻机、炼钢、铁道、挖泥船、伐木、水泥和陶土生产等方面。奥氏体锰钢适用于搬运和处理土石材料的设备(如岩石破碎机、研磨机、挖泥斗以及碎石和岩石的输送泵)。其他应用还包括破碎锤和用于汽车回收材料的格栅，以及军事上的坦克履带板。还有一个重要用途就是辙岔、路闸和道叉等铁道路轨机件，车轮对于这种交叉处的冲击特别严重。由于奥氏体锰钢能耐金属对金属的磨损，它还应用于链轮、驱动轮、齿轮、飞轮、传送链、摩擦板以及制动块。

奥氏体锰钢的某些性能会限制其应用。它难以被切削加工，而且屈服强度仅为345~415MPa(50~60ksi)。所以在受力大的情况下，它不宜用于进行精密切削加工零件或必须限制塑性变形的零件。然而，锻打、冲压、冷轧或表面的爆震处理可以提高其屈服强度，并为具有韧性的心部组织提供坚硬的表面。

化学成分

许多不同种类的原始奥氏体锰钢常未曾获得专利就被公布，但是其中只有一部分被认定为有明显的改进。这些通常含有不同量的碳和锰，并视情况添加合金元素，如铬、镍、钼、钒、钛和铋。根据ASTM A128规定，最为普通的这些成分如表2.3-87所示。

表2.3-87　奥氏体锰钢铸件的标准成分范围

ASTM A 128牌号	化学成分(质量分数,%)						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si(最高)	P(最高)
A	1.05~1.35	11.0最低	—	—	—	1.00	0.007
B-1	0.9~1.05	11.5~14.0	—	—	—	1.00	0.07
B-2	1.05~1.2	11.5~14.0	—	—	—	1.00	0.07
B-3	1.12~1.28	11.5~14.0	—	—	—	1.00	0.07
B-4	1.2~1.35	11.5~14.0	—	—	—	1.00	0.07
C	1.05~1.35	11.5~14.0	1.5~2.5	—	—	1.00	0.07
D	0.07~1.3	11.5~14.0	—	—	3.0~4.0	1.00	0.07
E-1	0.7~1.3	11.5~14.0	—	0.9~1.2	—	1.00	0.07
E-2	1.05~1.45	11.5~14.0	—	1.8~2.1	—	1.00	0.07
F	1.05~1.35	6.0~8.0	—	0.9~1.2	—	1.00	0.07

用于锻件的牌号种类比较少，通常采用接近于ASTM规定成分的B-3类。有些锻件牌号钢含有(质量分数)大约0.8%C和3%Ni或1%Mo。锻件牌号钢的生产常要求大的熔炼批量订单，而小批量更适宜于铸件牌号钢及其改进型的生产。在锰钢的铸造清单中，可以有好几十种的牌号变型。牌号变型的生产通常是为了满足应用、截面大小、铸件大小、成本以及可焊性方面考虑的要求。用于低磁导率和低温上的更高含锰量钢(w(Mn)为15%~30%)也已开发出来。

铸造状态的性质

虽然一般都认为处于铸造状态的奥氏体锰钢作为正常使用有些太脆，但从表2.3-87可看出，对于这个看法也有例外。表中列出五种不同厚度的铸造状态的奥氏体锰钢的力学性能。这些数据表明w(C)降低到1.1%以下和/或加入大约1.0%Mo或3.5%Ni(质量分数)时，由此得到的轻型或中型厚度的铸造状态塑性在工业上还是可以接受的。这些数据还可适用于焊接堆积，即一般焊接后所留下的一种堆积状态，它基本相当于材料的铸造状态。

铸件的工业应用。这种作为铸造状态的工业应用可以降低成本和节省能源，而且可以防止薄壁铸件在固溶处理过程中发生脱碳和在水淬过程中发生翘曲，及其由此引发的问题。在锰钢的某些用途里，并不要

求完全的塑性和韧性。

厚截面。铸件在砂型中的冷却速度会随着截面厚度的增加而降低。这就提高了因碳化物沉淀而造成脆化的概率。易于产生高残余应力的形状，例如圆柱形和圆锥形受到的影响尤深。这些应力产生的原因最有可能是铸件在正常冷却过程中伴随着碳化物的析出和奥氏体的转变而发生的体积变化。

图2.3-37所示是一种1.25C-12.8Mn钢在850～500℃(1560～930℉)因等温分解而发生的体积变化，这正是当一铸件在其铸模里冷却或为重新奥氏体化而再次加热时所发生脆化的主要温度范围。在850～705℃(1560～1300℉)下，只有碳化物析出，基本上都包围在奥氏体晶粒的外面和呈片状补缀于晶粒内。片状碳化物看上去像粗珠光体，但实际上它们是奥氏体里面的板状碳化物。当低于705℃(1300℉)，特别是在650～550℃(1200～1020℉)时，先期析出的碳化物经核化成为球状珠光体，并以较快的速度生长。

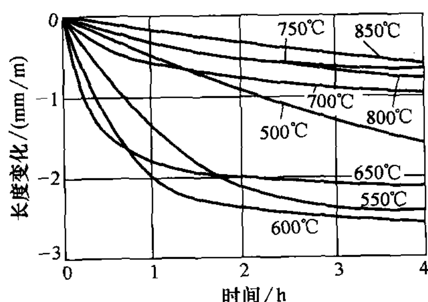


图2.3-37 在等温转变中，奥氏体1.25C-12.8Mn钢的长度变化

穿晶针状碳化物在低于大约600℃(1110℉)的温度里也会趋于析出，特别在$w(C)$超过1.1%的奥氏体里。在1.2C-12Mn钢中，这种析出能继续到温度降至大约300℃(570℉)。此后，当接近周围的环境温度时，一些贫碳化的奥氏体会向马氏体转变。

热处理

通过热处理强化奥氏体锰钢，能使之安全和可靠地广泛应用于各种不同的工程用途里。作为一种能形成正常的拉伸性能和所需要韧性的标准处理方法，固溶退火和淬火也就是在奥氏体化后接着很快进行水淬。还可以使用这种处理的不同改进方法，用于增强其特定要求的性质，如屈服强度和耐磨料磨损性。

锰钢铸件的工业热处理包括缓慢加热到1010～1090℃(1850～2000℉)，在该温度里按厚度每25mm(1in)保温1～2h，然后在搅动的水里淬火。在保温的过程中，特别是可锻性锰钢中的奥氏体晶粒有一种生长的趋势，虽然最终的晶粒大小在很大程度上是由浇铸温度和凝固速度所决定的。

对于牌号为E-2的锰钢(表2.3-87)，常规定或推荐使用一种经改进的热处理方法。这种处理包括将铸件加热到595℃(1100℉)，再保温8～12h，由此导致在组织中形成相当多的珠光体。然后进一步将铸件加热到大约980℃(1800℉)，使组织重新奥氏体化，该步骤是为了使珠光体区域转变为含有呈弥散分布的小碳化物颗粒的细晶粒奥氏体，只要奥氏体温度不超过大约1010℃(1850℉)，这些碳化物颗粒就一直保持不被溶解，然后经过淬火产生一种弥散硬化的奥氏体。这种钢与在较高的奥氏体化温度下经完全固溶处理的同样的钢相比，具有更高的屈服强度、更高的硬度及较低的塑性(表2.3-88)。这种弥散硬化热处理使得高含碳量成为可能，因此又提高了其耐磨料磨损性。

注意事项。淬火的速度是很重要的，但困难的是难以大幅度提高从热表面到搅动水的热传递速度，或难以大幅度提高由金属的热导率所确定的速度。结果，厚截面的铸件相对于较薄的铸件，其心部的力学性能就比较低。图2.3-38所示是四种不同厚度的金属板在水里淬火时所预期的冷却速度。表2.3-89所列是1.11C-12.7Mn-0.5Si-0.043P钢在大约980℃(1800℉)的温度里水淬后，所测到的平均力学性能，淬火时铸件的冷却速度如图2.3-38所示。

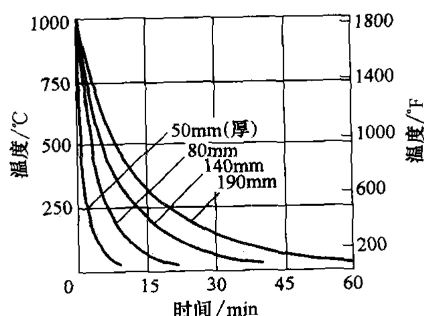


图2.3-38 不同厚度的奥氏体锰钢的冷却曲线。冷却曲线与所示厚度的厚钢板的冷却曲线近似相当

根据厚截面的残余应力及其伴生的低力学性能，可以确定工业用铸件的通常最大厚度约为127～152mm(5～6in)，尽管截面厚度大到405mm(16in)的铸件也已生产出来。

表2.3-88　典型的铸造奥氏体锰钢的化学成分与力学性能

化学成分(质量分数,%)				试件类型	截面大小		0.2%条件屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功		硬度HB
C	Mn	Si	其他		mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft	
普通锰钢															
0.85	11.2	0.57	—	圆形	25	1	—	—	440	64	14.5	—	—	—	—
0.95	13.0	0.51	—	圆形	25	1	—	—	420	61	14	—	—	—	—
1.11	12.7	0.54	—	圆形	25	1	360	52	450	65	4	—	—	—	—
1.27	11.7	0.56	—	圆形	25	1	—	—	360	52	2	—	—	—	—
1.28	12.5	0.94	—	基尔试件	102	4	—	—	330①	48①	1①	—	3.4	2.5	245
1.36	20.2	0.6	—	Y形试件	51	2	—	—	425①	62①	1①	—	—	—	283
1%Mo锰钢															
0.61	11.8	0.17	1.10Mo	圆形	25	1	315	46	710	103	27.5	23	—	—	163
0.75	13.9	0.58	0.90Mo	圆形	25	1	340	49	740	107	39.5	30	—	—	183
0.83	11.6	0.38	0.96Mo	圆形	25	1	345	50	695	101	30	29	—	—	163
0.89	14.1	0.54	1.00Mo	圆形	25	1	360	52	690	100	29.5	22	—	—	196
1.16	13.6	0.60	1.10Mo	圆形	25	1	400	58	560	81	13	15	—	—	185
0.93	13.6	0.67	0.96Mo	板形	25	1	365	53	510	74	11	16	72	53	188
0.99	12.6	0.6	0.87Mo	板形	25	1	—	—	460①	67①	6①	—	—	—	—
0.98	12.6	0.6	0.87Mo	板形	50	2	—	—	435①	63①	4①	—	—	—	—
0.95	12.6	0.6	0.87Mo	板形	102	4	345	50	385	56	4	4	—	—	—
1.30	13.1	0.78	0.99Mo	基尔试件	102	4	—	—	435①	63①	2①	—	8	6	230
1.33	19.8	0.6	0.99Mo	Y形试件	51	2	—	—	505①	73①	2.5①	—	—	—	231
2%Mo锰钢															
0.52	14.3	1.47	2.4Mo	圆形	25	1	370	54	600	87	15.5	13	—	—	220
0.70	13.6	0.63	2.0Mo	圆形	25	1	360	52	785	114	41	29	—	—	180
0.75	14.1	0.99	2.0Mo	圆形	25	1	365	53	745	108	34.5	27	—	—	183
0.91	14.1	0.60	2.0Mo	圆形	25	1	395	57	705	102	27.5	21	—	—	196
1.24	14.1	0.64	3.0Mo	圆形	25	1	440	64	600	87	7.5	10	—	—	235
1.40	12.5	0.62	2.1Mo	圆形	25	1	420	61	550	80	3.5	5	—	—	228
1.34	12.0	0.43	2.2Mo	基尔试件	51	2	415	60	435	63	3.5	7	—	—	235
3.5%Ni锰钢															
0.75	13.0	0.95	3.65Ni	圆形	25	1	295	43	655	95	36	26	—	—	150
0.80	13.5	0.53	3.61Ni	圆形	25	1	—	—	530	77	26	—	—	—	—
0.91	13.3	0.53	3.38Ni	圆形	25	1	—	—	510	74	24	—	—	—	—
6Mn-1Mo合金															
0.90	5.8	0.37	1.46Mo	磨机衬垫	102	4	325	47	340	49	2	—	9	7	181
1.00	6.0	0.43	1.03Mo	基尔试件	102	4	330	48	365	53	2	3	—	—	195
0.89	6.3	0.6	1.20Mo	板形	102	4	—	—	330①	48①	1①	—	—	—	—
1.27	6.1	0.42	1.07Mo	基尔试件	51	2	365	53	400	58	1	1	3	2	273

①用切自铸件的6.4×13mm(1/4×1/2in)试棒，并且在中心25mm跨度上加载使之断裂，以此横向弯曲试验换算得到的性能。

经热处理的力学性能

取自经热处理铸件上的试件经试验而得到的锰钢抗拉强度和塑性，随其截面积的增大而显著降低。这是由于厚截面在铸型里无法以足够快的速度凝固来避免粗大的晶粒，除非有特殊的控制条件，这是热处理所难以改变的情况。如表2.3-89所示，细晶粒试件的抗拉强度和塑性都比粗晶粒试件的高30%。

表2.3-89　1040℃(1900℉)水淬1.11C-12.7Mn-0.5Si-0.043P铸件的平均力学性能

板厚		晶粒种类	屈服强度		抗拉强度		伸长率[①](%)	断面收缩率(%)	夏比V形缺口冲击吸收功	
mm	in		MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft
50	2	粗	338	49	635	92	37.0	35.7	137	101
		细	365	53	820	119	45.5	37.4	134	99
83	3¼	粗	345	50	620	90	25.0	34.5	133	98
		细	359	52	765	111	36.0	33.0	115	85
140	5½	粗	338	49	545	79	22.5	25.6	115	85
		细	352	51	705	102	32.0	28.3	100	74
190	7½	粗	324	47	455	66	18.0	25.1	77	57
		细	359	52	725	105	33.5	29.2	66	49

注：拉伸试验的试件为直径6.40mm(0.252in)，并以25mm(1in)为计量长度。
①25mm(1in)。

晶粒大小也是造成铸造锰钢和锻造锰钢之间差异的主要原因(后者通常为细晶粒)。对于铸造牌号B-2，抗拉强度和伸长率的标准偏差分别约为69MPa(10ksi)和9%。对于致密、中等粒度的晶粒的且经过很好的热处理的铸造试件，则以825MPa(120ksi)和40%为其中值。这种牌号钢的抗拉强度和伸长率的离散带分别从620扩展到1035MPa(90到150ksi)和从13%扩展到67%。

力学性能是随截面大小变化而变化的。102mm(4in)厚截面的抗拉强度、伸长率、断面收缩率和冲击功比25mm(1in)厚截面的要低得多。因为生产铸件的截面厚度常为102～152mm(4～6in)，所以这是一个采用适当牌号技术规范的一个重要依据。

缺口试棒的冲击试验值可能特别高。夏比试验的试件有时在试验机上被弯曲和拉伸，却没有发生断裂。偶尔，其测值发生偏差是由于试件制备不当所致。缺口应当用精密磨削加工，以便最大限度地减少在其缺口尖端处的加工硬化。

奥氏体锰钢能在零下温度但温度 *Ms* 以上继续保持韧性。这种钢很明显不受氢脆的影响，尽管钢的脆化容易产生于低碳含量(w(C)＜近0.02%)和高锰含量。随着温度的降低，其冲击强度也逐渐降低。因为冲击强度-温度曲线到了－85℃(120℉)以下并没有尖锐的转折，故转变温度并不好确定。在一定的截面大小和一定的温度下，添加镍和锰有助于增强冲击强度，然而提高碳含量和铬含量就没有这样的效果。

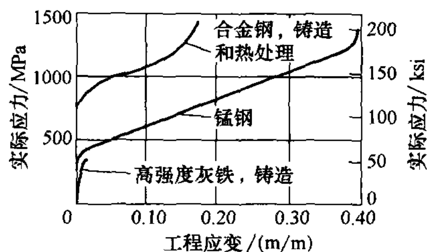
奥氏体锰钢还有高抗裂纹扩展的能力，这与它对于渐进式失效的非常不敏感性有关。正因为如此，任何扩展的疲劳裂纹都可以进行检测，以保证在发生彻底的失效以前将相关的零件或零件组件从使用现场拆除，这种功效对于铁道路轨的应用有独特的优势。据报道，奥氏体锰钢的疲劳极限为270MPa(39ksi)。

屈服强度和硬度因截面大小仅发生很少的变化。大部分的牌号钢在固溶退火和淬火后的硬度约为200HB，这个数值对于估算其切削性或耐磨性是没有什么意义的。由于在切削加工或其后使用过程中的加工硬化，其硬度会迅速提高，以致奥氏体锰钢必须根据某些相关因素但不是硬度进行评估。

锰钢的实际拉伸特性用图2.3-39的应力-应变曲线来表示较好，图2.3-39曲线将锰钢与灰铸铁和经热处理、并且名义抗拉强度与之差不多的高强度低合金钢进行比较。对于不允许产生轻度或中度变形的一些用途，要避免选用低屈服强度的合金，除非由此造成问题的零件是可以经修磨而恢复使用的。然而，如果变形不是很重要，则可认为低屈服值只是暂时性的，因为它经过变形会产生一种新的、更高的屈服强度，这种屈服强度就跟局部所吸收的变形量相当。

加工硬化

各种锰钢的加工硬化能力并不尽相同，它们的这



合金	化学成分(质量分数,%)				
	C	Mn	Si	Cr	其他
合金钢Q和T	0.29	1.30	0.52	0.37	0.36Mo
锰钢	1.22	13.08	0.33	0.10	0.05Al
灰铁	2.79	0.75	1.32	0.10	…
Q和T分别表示淬火和回火。					

图 2.3-39 锰钢、铸造合金钢(淬火和回火)**及高强度灰铁的实际应力对工程应变的曲线**

种性能甚至超过亚稳态的奥氏体不锈钢。例如，如含有(质量分数)1.0%~1.4%C 和 10%~14%Mn 的标准牌号锰钢的加工硬化，可从 220HV 直到最大超过 900HV。经持续工作的铁路道岔的磨损表面的硬度范围一般从 495~535HB。最高能达到的硬度决定于许多因素，包括规定的成分、应用局限性、加工硬化的方法以及使用前的硬化步骤。业已表明，在重压下的摩擦所能达到的最高硬度高于通过简单碰撞产生的硬度。

加工硬化的方法。通常用碰撞如锤击来产生加工硬化。即使是高速轻击也会形成具有表面硬化的浅层变形，尽管最后只是形成一般程度的表面硬度。重载碰撞可产生较深层的硬化，但表面硬度值一般较低的。在碰撞下的金属流动情况及相应的硬度提高如图 2.3-40 所示，并将标准的 12% Mn(质量分数)钢与空气硬化的铬-镍-钼合金钢进行比较。通过自身的研磨能够产生的加工硬化尚未能有深刻的了解。

爆炸硬化作为锤击和挤压硬化的替代可以实现一种变形较少的硬化。将季戊四醇四硝酸酯或硝酸铵和三硝基甲苯(NTN)混合物以厚度为 2.11mm(0.083in)的塑料爆炸薄板的形式粘在钢的表面并进行引爆。通常在铁道路轨的加工中，要进行三次爆炸才能达到所要求的硬度。

重新加热

在对锰钢在现场进行重新加热以前，必须对这种重新加热的效果进行慎重的考虑。不像一般的结构钢经过重新加热会变得更软和更有塑性，锰钢重新加热到一定程度会引发碳化物的析出或奥氏体的转变，以

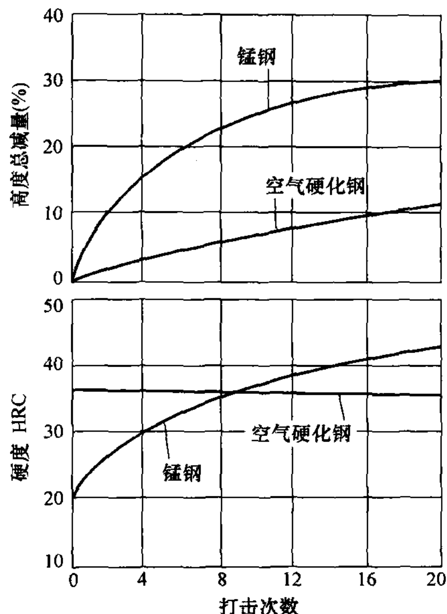


图 2.3-40 经受反复碰撞的锰钢和空气硬化钢的塑性流动(上图)**和加工硬化**(下图)。直径和长度均为 25mm(1in)的试件，其端部受到冲击吸收功为 680J(5001bf·ft)的反复打击。锰钢的成分(质量分数,%)和热处理为 1.17C-12.8Mn-0.46Si、1010℃(1850℉)的水淬。空气硬化钢的成分(质量分数,%)和热处理为 0.74C-0.88Mn-0.30Si-0.75Ni-1.4Cr-0.38Mo，900℃(1650℉)的空冷、再次加热到 705℃(1300℉)、空冷。

致降低其塑性。作为一般性的规则，锰钢无论有意或无意都不应该加热到 260℃(500℉)以上，除非这种加热后接着进行固溶退火和淬火。

耐磨性

与大部分其他耐磨料磨损的铁质合金相比，选择锰钢广泛用于各种耐磨料磨损用途的主要理由是其具有韧性的优势和适中的成本。通常其耐磨料磨损性不如马氏体白口铸铁或马氏体高碳钢，但是它往往超过珠光体白口铸铁或珠光体钢。

所发生的磨损类型会对锰钢的性能产生主要影响。锰钢具有优异的金属对金属耐磨性，如用于滑轮、起重机车轮和汽车车轮；良好的耐碰撞磨损性，如用于岩石的搬运和破碎设备；中等的耐高应力(磨削)磨料磨损，如用于球磨和棒磨机里的衬套；以及相对较低的耐低应力磨料磨损，如用于搬运散砂和砂浆的设备。

金属对金属的接触。在包含金属对金属接触的用途里，锰钢的加工硬化具有特别的优点，因为它能降

低摩擦因数，而且如果温度不太高的话它还赋予耐擦伤的能力。压缩载荷，而不是冲击载荷，能产生一种所要求的变形，借此形成一种平滑的硬表面并具有很好的耐磨性，却不会擦伤接触表面。铁路轨道工程上用的滑轮、磨损板和铸件都属这类普通应用。锰钢还能用于某些水润滑的轴承里。

磨料磨损。在有强力冲击或高压缩和结构应力的用途里，非常硬和耐磨料磨损的马氏体铸铁比锰钢磨损得更慢。然而，这些铸铁常常有相当部分的原始横截面还未发生磨损就因早期断裂而损坏了。而锰钢在发生断裂之前可以磨得像纸一样薄。

硬度约为400～450HB的珠光体白口铸铁有与锰钢相同的脆性，但不如其耐磨。洗矿机凸耳的对比试验表明，锰钢能磨损掉25%而不发生断裂，而在同样的时间里，白口铸铁的凸耳磨到不能用为止时，已有14%发生断裂。在粘土的粉碎轧辊中，锰钢持续使用的时间是白口铸铁或冷硬铁的2～3倍。用于磨筒衬垫，铸铁只能维持三年，而与之对比的锰钢可达十年。锰钢之所以优于白口铸铁，部分归功于其不易发生断裂和擦伤，但还有些可能是由于其固有的较高耐磨性。

用连锁铸模铸造的锰钢无接头链条还具有耐磨性，在某些用途里，其延续使用的时间是热处理钢链条的3～9倍。锰钢适用于经受磨料磨损的输送带以及牵引链条，并且能用于承受重载。

锰钢在由悬浮的磨料颗粒气流引起的磨损（冲击腐蚀）中所起的耐磨作用并不理想，故不应将其用于如喷砂或喷丸处理的设备。

利用颚式破碎机的磨料磨损试验对奥氏体的12%～14%Mn（质量分数）及不同碳含量的锰钢的耐磨性与其他的钢和白口铸铁进行比较（如图2.3-41所示）。从中还可以看到，经淬火和回火的低碳低合金钢（ASTM 517，型号B，硬度为269HB）的磨损率，每次试验都将其作为对比的标准。当在双对数坐标纸上画出每一种材料的相对磨损率（磨损比）对于含碳量增加的曲线时，奥氏体钢和铁的结果曲线的走向是沿直线下降的，而马氏体钢和铁的结果曲线在奥氏体合金曲线的下面沿着一条平行线下降。磨损比的减小代表其磨料磨损耐磨性的按比例增加。于是，由图2.3-41足以得出这样的结论，即奥氏体钢和马氏体钢的磨料磨损耐磨性都是随含碳量的增加而提高，而且对于某一给定的含碳量，马氏体钢的耐磨性优于奥氏体钢。然而，马氏体钢和白口铸铁的耐碰撞磨损性有限，因为它们缺少韧性。如果将珠光体钢和钢的磨损率也画在图2.3-41上，则会处于奥氏体钢的曲线之上。由于珠光体钢对任何给定含碳量都有很大的硬度变化范围，故其磨损率数据也是相当离散的。

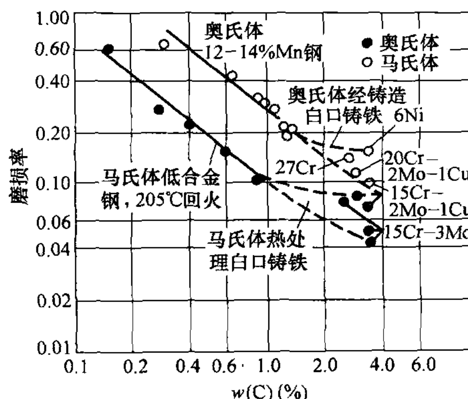


图2.3-41　颚式粉碎试验的各种铁质合金的相对磨损率

腐蚀

锰钢不具备耐腐蚀性，它很容易生锈。而且其腐蚀与磨料磨损结合在一起，当它们常应用于采矿及制造的环境里时，其金属发生劣变和分解的速度也仅比碳钢稍微低一些。如果锰钢的韧性和非磁特性对于船舰用途来说是非常重要的话，那么它的镀锌保护性通常还是令人满意的。

第12节　碳素钢和合金钢的淬硬性

钢的淬硬性。这是一种用钢通过淬火而形成的硬度深度及其分布表征的性质。可认为具有较深的淬硬深度的钢有高淬硬性，而浅的淬硬深度则为低淬硬性。因为淬火的主要目的是为了获得达到有一定深度要求的、令人满意的硬化，因此在为热处理零件选用钢材的时候，淬硬性通常是最重要的单一因素。

淬硬性不应由此与硬度或最高硬度相混淆。任何钢能达到的最高硬度惟一取决于含碳量。还有，利用小的试件在最快的水淬冷却速度条件下能得到的最大硬度值差不多总是高于在热处理的生产条件下所获得的最大硬度，因为较大尺寸所受的淬硬性限制使马氏体的形成达不到100%。碳和马氏体的含量对硬度的影响如图2.3-42所示。

钢的淬硬性几乎完全受在奥氏体化温度下的化学成分（碳和合金含量）以及在淬火的那一时刻的奥氏体晶粒度的大小的控制。在某些情况下，奥氏体的化学成分并不与化学分析所检测的结果一样，因为在奥氏体化温度里的一些碳化物可能并未溶解。这部分的

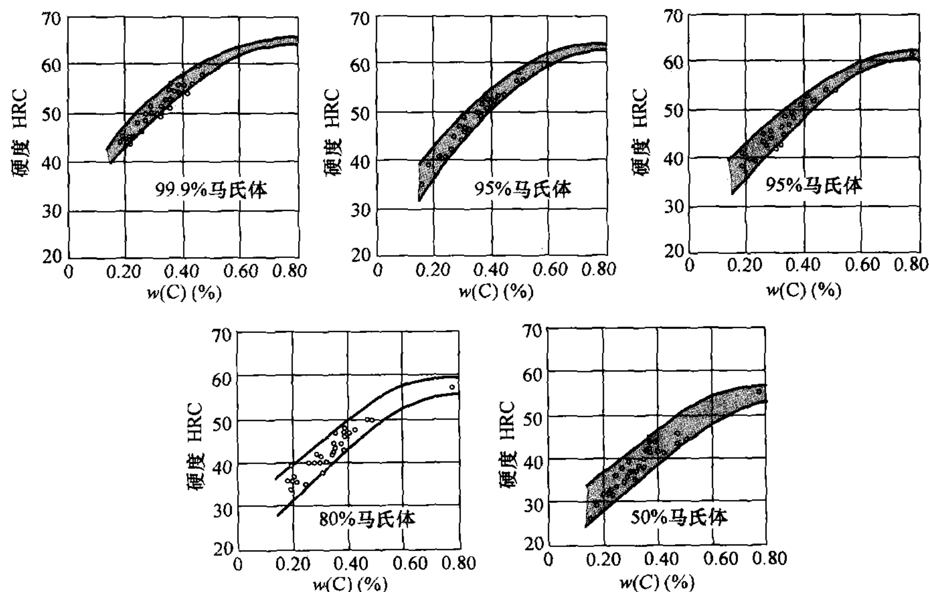


图 2.3-42　碳和马氏体含量对硬度的影响

碳化物会反映在化学分析里，但是并没有溶解于奥氏体中，故无论碳含量还是合金含量都无助于淬硬性。再者，通过让转变产物形核，未曾溶解的碳化物会有效地降低淬硬性，这对于高碳钢（w(C)为0.50%～1.10%）和合金渗碳钢特别重要，它们会在奥氏体化的温度下含有过量的碳化物。因此，当要确定特定成分的钢的基本淬硬性时，像奥氏体化的温度、保温时间和先期的显微组织的一些因素，有时都是其非常重要的变量。

淬硬性试验

钢的淬硬性最好通过研究，以一种标准化外形的钢对其冷却速率的硬化响应来进行评价，所谓的标准化外形就是对此不同的冷却速率可以在一次次的试验中容易并一致地重复再现。

端淬或（约米尼）试验。这是最容易进行的一种能实现冷却要求的淬硬性试验。试验用的试件为直径1in(25.4mm)、长度4in(102mm)的圆棒，用水对其一端的端面进行淬火。用于制造试件的棒料，在切削加工以前必须进行正火处理。试验的步骤为：将试件加热到适当的奥氏体化温度，再将其移至一个专用的淬火夹具里，并以垂直位置夹持，使之距离一开口之上12.7mm(½in)，然后用一桶水通过该开口移向试件的底面。当试件的底面用这桶水进行淬火时，其另一端在空气中缓慢冷却，而试件的中间部分则以介于两端之间的速度冷却。淬火结束，在其圆柱表面相隔180°磨出两个深度为0.015in(0.38mm)的平面，然后从水淬火的一端开始，合金钢以$\frac{1}{16}$in(1.59mm)、碳钢以$\frac{1}{32}$in(0.79mm)的间距测量洛氏C的硬度值。把这些硬度值及其在试棒上的位置画成曲线，如图2.3-43所示，以此表示硬度与冷却速度之间的关系，实际上这就是钢的淬硬性。图2.3-43还表示了所标明试验位置的冷却速度。标准试验方法详见ASTM A255和SAE J406。

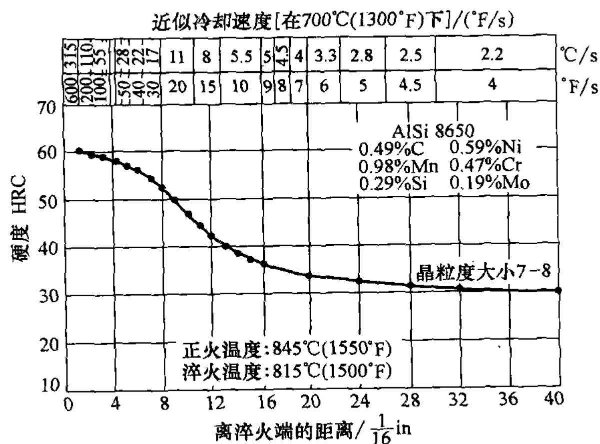


图 2.3-43　展示顶端淬火的淬硬性试验方法

如图2.3-43所示，作为8650钢试件的淬硬性曲线就是从通过许多炉次的8650钢测试获得的最小和最大淬硬性曲线之间所取得的近似中值曲线，最大和最小的淬硬性曲线就定义为8650钢的所谓H-带（淬

透带）的极限（市场供应的每一种牌号钢的淬硬性都可以用定义这些极限的这种H-带来代表）。

渗碳淬硬性试验。通常有必要确定渗碳钢的高碳表层区的淬硬性。这种数据对于控制渗碳工艺和淬火工艺，以及确定一种特定的钢是否能满足用其制成的渗碳零件对于硬度和渗碳层厚度的要求来说都是很重要的。

渗碳层的淬硬性是按下面步骤进行测定的：将一种标准的顶端淬火试棒放置在925℃（1700℉）的温度里8h进行渗碳，再用通常的方法进行顶端淬火。同时将一根对照用的试棒放置在一起进行渗碳，用于确定碳的渗透情况。从试件表面逐层地切下材料并分析其化学成分，以此确定不同深度层上的含碳量。将其画成碳的渗透曲线就能确定约米尼试棒中不同含碳量的深度，假设顶端淬火试棒与碳梯度试棒两者里面的碳分布是一样的。然后要在顶端淬火试棒上非常仔细地磨削纵向平面到不同的深度（通常达到碳的浓度为1.1%、1.0%、0.9%、0.8%，有时可以低至0.6%），通过在上述不同含碳量上的横向硬度测定可以确定其淬硬性。在磨削过程中，必须注意防止过热和回火，而且在进行硬度测试时，必须同样注意保持准确的平面中心，以此保证与含碳量一一对应的硬度。测硬度应用洛氏A读数而非洛氏C，因为这样可以将压头压入到较软亚表层的深度减到最小。在画成曲线时，将洛氏A值换算成洛氏C值，图2.3-44所示是EX19钢的渗碳淬硬性曲线。

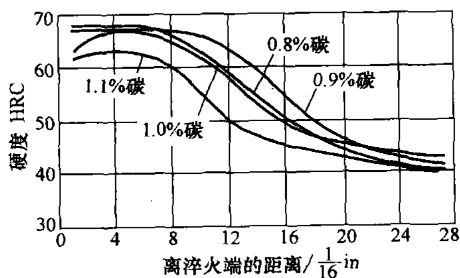


图2.3-44　EX19钢的渗碳淬透性，成分（质量分数，%）：0.18～0.23C，0.90～1.20Mn，0.40～0.60Cr，0.08～0.15Mo，0.0005B最小

SAC淬硬性试验。这种试验应用于所有的普通碳素钢和低合金钢，而不能用于碳素工具钢，而且仅适用浅层硬化钢，直径大于25mm（1in）的这种钢不予淬透。对于测定浅层硬化钢的淬硬性，因为顶端淬火曲线的剧变梯度，故用表面-面积-中心（SAC）试验方法有时看来比顶端淬火试验更有区分性。

SAC试验可用于检测经过奥氏体化和淬火的横截面上的硬度。试件为140mm（5½in）长和25.4mm（1in）直径。在规定温度下经1h正火并在空气中冷却以后，通过保温30min使其奥氏体化，并且在（24±5.5）℃[（75±10）℉]水温中淬火，在里面保持到试件的温度完全一致为止。

经过淬火以后，从硬化的试件中部切下一段长度为25.4mm（1in）的圆柱体。圆柱体的两个切割表面要进行仔细磨削平行，以便去除有可能在切割过程中产生的任何烧伤和回火，并保证其表面平整，适合放置在硬度测试仪的平台上或夹具里。在圆柱表面上至少要互相间隔90°测量四点的洛氏硬度值。这些读数的平均值就作为其表面读数。然后再在横截面上按步长1.59mm（$\frac{1}{16}$in）从表面到中心测出一系列的洛氏C读数。由此可计算出一个数值，并用所谓的SAC数值作为表征的代码。该代码是由一组三个两位数构成。例如SAC No. 63-52-42，其代表的意思为表面硬度为63HRC、洛氏-英寸面积为52和中心硬度为42HRC。面积的计算如图2.3-45所示。

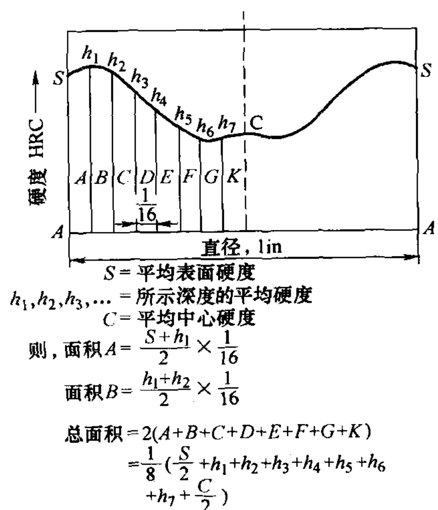


图2.3-45　SAC面积估算

含碳量的影响

碳在可淬硬的合金钢里有双重作用。它可以控制最高能达到的硬度，并对淬硬性产生积极的影响。而后者，即对淬硬性的影响又为其所含合金元素的数量和种类而得到有效增强，因为淬硬性是碳因子和所有合金倍增因子的乘积。因此可以断定含碳量是提高淬硬性的最为经济的办法。在一定程度上这是事实，但是还有多种因素制约碳的大量使用：

- 高含碳量一般会降低在室温和零度以下温度里的韧性。
- 它会产生退火状态下的更硬和更为耐磨的显微组织，从而使得冷剪、锯削、切削加工以及其他形式的冷加工工艺变得更为困难。
- 使它在热形变加工中对热脆性更为敏感。
- 它使钢在热处理中更容易开裂和扭曲变形。因为这些缺点，在用于机械零件的钢中，除了弹簧和轴承很少使用 w(C)超过0.60%的钢，而且 w(C)为0.50%~0.60%的钢都比 w(C)为0.50%以下的钢应用得较少。

图2.3-46所示是六类钢的最低淬硬性曲线之间的不同。对于每一类的合金含量基本不变，而且可以观察到 w(C)对淬硬性的影响范围是0.15%~0.60%。而其对硬度的影响，则可以用在顶端淬火试件上的任何位置，即以任何冷却速度的曲线之间的垂直距离表示。这种影响大小是按照合金元素的种类和数量而显著变化的。例如，对照图2.3-46d、2.3-46e和2.3-46f，三类钢的每一类的 w(C)从0.35%提高到0.50%，都会引起位于顶端淬火试件上的四个不同位置上的硬度提高(洛氏C读数)，如下所示：

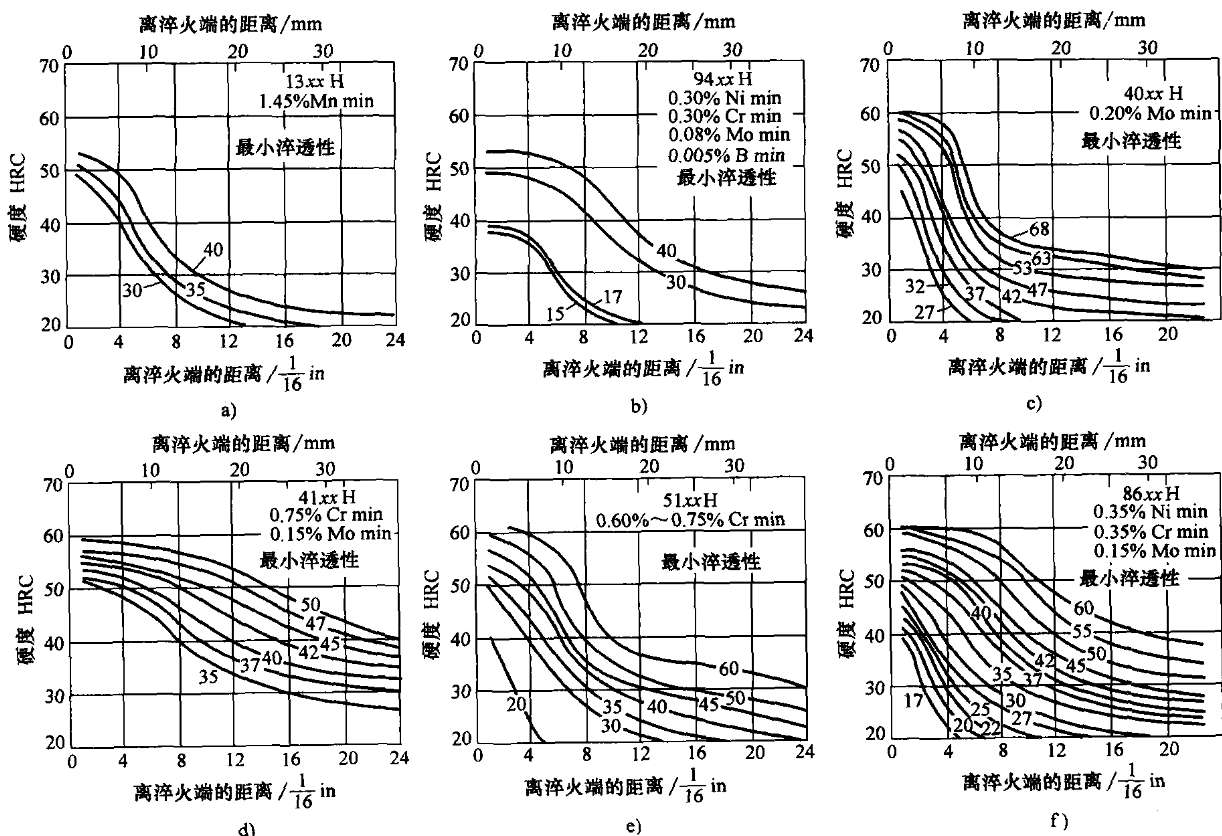


图2.3-46　六类合金H-钢的含碳量对最小顶端淬火淬硬性的影响。每条曲线附近的数字表示钢的含碳量，将其插入以xx表示的钢牌号里

系　列	离淬火端的距离/in			
	1/16	4/16	8/16	12/16
41xxH	8	10	17	20
51xxH	8	13	9	8
86xxH	8	12	18	12

含碳量对淬硬性的影响可以从水平坐标轴上读出。例如，在比较硬度为45HRC的8650和8630两种钢的含碳量对于其淬硬性的影响时，影响可以表达为6/16(即10/16－4/16)。

相类似的，硬度为45HRC和名义 w(C)为0.35%和0.50%时，51xx类的含碳量对淬硬性的影响要小得多，而41xx类的含碳量对淬硬性的影响要大得多。

若从淬火速度来考虑对淬硬性的影响，w(C)为0.15%的碳与合金元素的特定配比对于产生45HRC的硬度所需求的冷却速度(或淬火速度)的影响要大

于其他配比对其的影响。举例说，在含有(质量分数)0.75% Cr 和 0.15% Mo 的一类钢(如 41xxH 类的钢)里，增加 0.15%的含碳量就可以把为得到 45HRC 硬度所需求或临界的冷却速率从 25℃/s(45℉/s)降低到 4.6℃/s(8.3℉/s)；然而在含有 0.75% Cr 和不含有钼的一类钢(51xxH 类的钢)里，增加同样多的含碳量，就会把冷却速率从 47℃/s(85℉/s)降低到 26℃/s(37℉/s)。

碳与合金元素的含量对冷却速度的影响的实际意义是很大的。直径为 51mm(2in)的 4150 钢棒料用油淬而不需搅动就可获得一半的半径范围的硬度 45HRC。而同样直径的 4135 钢棒料用水淬而还必须强烈搅动才能获得一半的半径范围的相同硬度。比较 5135 和 5150 的两种直径均为 32mm(1¼in)的棒料，5135 棒料必须用搅动水淬才能得到一半的半径范围的硬度 45HRC。为获得同样的硬度，5150 棒料只要用缓慢搅动的油淬。简而言之，含碳量或添加一种合金元素的增加或减少，如 0.15%(质量分数)钼，都要为达到要求而从所要求的淬火烈度和所采用的截面尺寸这两个方面影响淬火的结果。

上述评价方法不同于根据理想临界直径的评价方法，后者不是以给定的硬度而是以其截面心部形成 50%马氏体作为淬火的依据，而其硬度还要随含碳量的变化而变化。所以，一个必须淬硬到最低硬度而不论其含碳量的零件，肯定是要求依照硬度而不是依照 50%硬度会有变化的马氏体来进行评价的，图 2.3-47 所示就是如何根据理想临界直径对进行钢评价，这种评价所表达的含义碳含量和合金含量对于想要借助一种理想淬火使其心部形成 50%的马氏体截面尺寸所起的作用。所谓理想淬火的定义为热量一传递到钢的表面就立即被外界吸收。

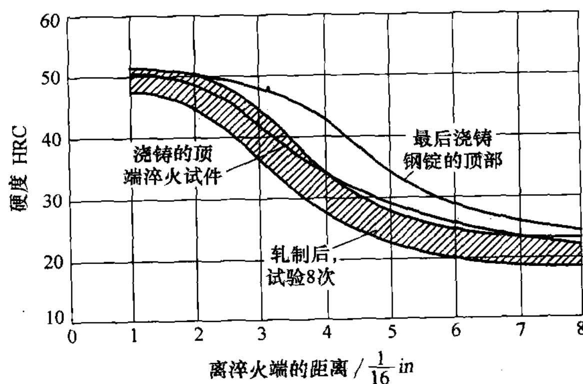


图 2.3-47　含碳量对理想临界直径的影响，以此计算每一种钢的最低化学成分

合金元素

在可热处理钢中的合金元素最重要的功能就是提高淬硬性，这样就有可能进行大截面的淬火，并可使用油淬而不是水淬，以此将扭曲变形降至最低并防止开裂。

在考虑标准合金钢时，不难发现，在实际应用中若将它们淬火成为马氏体，并回火成为具有 50HRC 以下的相同硬度，则所有标准合金钢都能形成相同的拉伸性能而不论其成分组成。然而，不应就此推论具有相同硬度的一切回火马氏体在各个方面都是相似的。举例说，普通碳素马氏体的断面收缩率低于合金马氏体。有时进一步的重要差别是在相同的硬度要求下，经充分淬火的合金钢比碳素钢需要更高的回火温度。这种在回火温度上的不同能起到在成品零件中降低残余应力的作用。应力的降低可以是优点也可以是缺点，这取决于零件里是否存在需要受控的压应力。尽管各种合金钢的拉伸性能不会有明显的差异，但是在断裂韧性和低温抗冲击性能方面却存在着相当大的差别。一般说来，含镍量较高的钢，如 4320、3310 和 4340 在一定的硬度和淬硬性的条件下具有较高的韧性。在某些用途中，钢的选择取决于韧性因素而不是淬硬性，但是淬硬性还是很重要的，因为能充分淬火成为 100%马氏体钢的韧性比那些淬不成的要高得多。

通常在一定的含碳量条件下，提高淬硬性的最经济的方法是提高锰的含量；铬和钼也属于提高单位淬硬性中最为经济的合金元素；而镍是提高单位淬硬性的所有元素中最贵的，但是当主要考虑韧性时，它是可靠的。

另一种有效又经济的合金元素为硼，当将其加入完全脱氧钢中时，能明显提高淬硬性。硼对淬硬性的作用在几个方面都是独特的：①非常少量的硼(w(B)约为 0.001%)就能对淬硬性产生很强的效果。②高碳钢硼对淬硬性的影响要远小于低碳钢。③氮和脱氧剂会影响硼的有效性。④高温处理会降低硼的淬硬性效果(建议当提供硼 H-钢的奥氏体化温度时，同时告知其 H-带)。

晶粒度大小的影响

随着奥氏体晶粒度大小从 ASTM8(6～10)增加到 ASTM3(1～4)，碳素钢的淬硬性可以提高达 50%。如果再同时增加含碳量，则效果更显著。如果发生淬火裂纹的危险性很小(截面厚度没有急剧的变化)，并且在工程上考虑许可的话，有时通过用晶粒较粗的

钢代替晶粒较细的或较为昂贵的合金钢从获得淬硬性看来是很现实的，然而却不建议这么做，因为粗晶粒钢的使用通常意味着在缺口韧性上要付出不小的代价，还会导致其他方面的困难。

在熔炼炉次中的差别

在钢锭浇注和凝固的过程中总会发生碳、锰和其他元素的偏析。结果，钢在这些偏析部分的淬硬性就会与钢锭的其余部分不一致。一般来说，从钢锭的顶部所取的试件具有的淬硬性比中部所取的要高，而其底部的又比中部的要低。

合金钢也有同样的情况。4028 钢的一次熔炼的顶端淬火试验结果（见图 2.3-48）表明，从熔炼到最后浇注的钢锭顶部所取的铸棒比取自熔化底面标为“铸造顶端淬火试件”的试件有更高的淬硬性，后者取自该次熔炼的大约中间时刻。

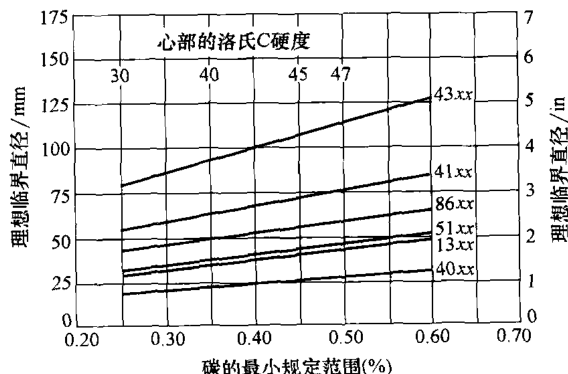


图 2.3-48 4028 钢一次熔炼的不同淬硬性

确定淬硬性的要求

在规定适当的淬硬性以前所需要的基本数据包括：①回火达到的最终硬度，即形成最能承受应力的显微组织以前所要求的淬火硬度。②该硬度在表面下必须达到的深度。③在硬化中应当使用的淬火介质。

淬火硬度。一种普通和较为经济的方法是选用含碳量最低的钢，而这种钢利用易于使用（或便于置备）的淬火介质得到需要的淬火硬度，继之将具有合适硬度的组织进行完全硬化。也就是它们应含有95%以上的马氏体，这也是完全硬化的一种通用和实际的标记。

硬化深度。零件硬化达到的深度和马氏体百分比会影响其使用性，但也总要影响所要求的淬硬性以及因此形成的成本。在弯曲受力不太大的最终成品零件中的四分之三半径的范围里，能硬化成 80% 的马氏体也许就够了，而在其他的一些零件里所要求的深度就更小了。后者主要包括那些在载荷作用下只有轻微变形的零件，在其外部甚至也只受到中等程度的受力。与此相对照的，有些主要受拉伸的零件和在很高的硬度条件下工作的零件，如各种弹簧常要求几乎整个截面都达到硬化。在汽车板簧中的钢板都设计成沿受载方向具有很低的截面模量。其允许的变形量是很大的，大部分的截面都高度受力。

就一般而言，并不需要超过所要求的硬化深度，就能使表面下的任何特定深度具有承受载荷的强度。如果不对这种深度要求进行全面的分析，其结果则可能是以较高的成本实施钢的过高技术指标，甚至还可能造成较大变形和淬火裂纹。

淬火介质。淬火介质的冷却能力是热处理工艺中的一个关键因素，这是因为经热处理的零件或截面借此获得所要求的最小淬硬性。作为衡量淬火烈度的冷却能力可以在一个相当大的范围内变动，因为：①选择特定的淬火介质；②控制搅拌；③用于改善淬火剂的冷却能力的添加剂。

一般情况下，淬火剂的烈度越大和淬火零件的对称性越小，则零件由淬火引起的尺寸及形状的变化也越大，而且淬火开裂的风险也越大。因此，尽管水淬成本低于油淬，且水淬的钢也不如要求油淬的钢那么贵，但是重要的是，要通过仔细分析淬火零件因水淬而引起的变形量和开裂可能性来决定能否实现水淬低成本的优势。油、盐和合成水聚合物的淬火剂都是可供选用的，但是它们的使用常要求钢有较高的合金含量，以满足其淬硬性的需要。

为一种给定的零件选择钢及其淬火介质的一个规则就是，钢应当具有不超过所用介质的淬火烈度要求的最小淬硬性，钢还应当含有与所要求的硬度和强度性能相适应的含碳量。这条规则基于钢的淬裂敏感性，是随 M_s 温度的降低和/或含碳量的提高而增加的。

表 2.3-90 列出了普通淬火介质及条件的典型淬火烈度或 H 值。这些数据所适用的介质都不含任何添加剂。但如在水中添加聚烯属烃乙二醇（聚合物）、油中添加适当的添加剂以及熔盐中添加水都可以使冷却能力得到相当大的改善。

淬硬性与淬火零件的大小、形状间的关系。当图 2.3-43 所示的顶端淬火的试验数据可以适用时，为了使其不同的关键部位使用不同的生产用介质来获得所需要的硬度、强度和显微组织，下列两种方法中的任何一种都可以用于估算具有一定大小和形状的钢零件所必须具备的淬硬性。这些方法为：

1. 顶端淬火硬度（J_{eh}）与不同的淬火形状的当量

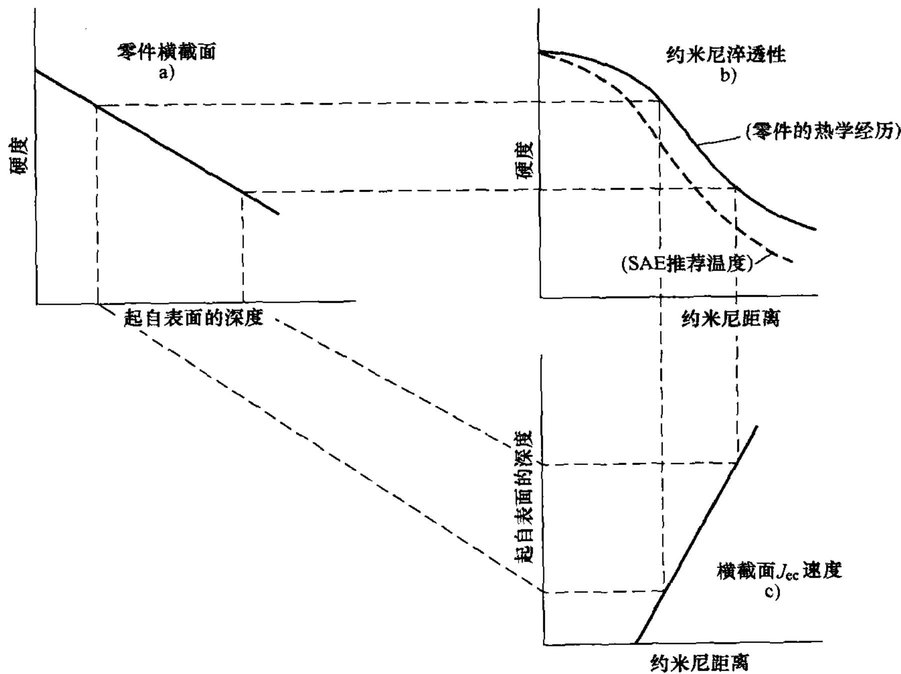
表 2.3-90　不同介质和淬火条件的淬火烈度

淬火介质搅动	标准流速		标准H值			
	m/min	sfm(ft/min)	空气	矿物油	水	盐水
无	0	0	0.02	0.20～0.30	0.9～1.0	2.0
缓慢	15	50	—	0.20～0.35	1.0～1.1	2.1
中	30	100	—	0.35～0.40	1.2～1.3	—
大	61	200	0.05	0.40～0.60	1.4～2.0	—
强	230	750	—	0.60～0.80	1.6～2.0	4.0

硬度部位之间的相关性。

2. 顶端淬火冷却速度值(J_{ec})与不同淬火生产形状的当量冷却速度部位之间的相关性。

图2.3-49所描述的方法1是更为精确和推荐使用的方法，因为在实际中可以发现当以同样速度冷却大截面产生的硬度比小截面的要低一些。



通过将已实行生产热处理零件的横截面上的硬度与顶端淬火试棒所得到的硬度值进行比较，可以求得约米尼当量冷却率(J_{eh})。通用步骤如下：

1. 选择所用生产硬化设备容易实现的硬化和淬火条件。
2. 选择低淬透性钢，如8620、4023或1040，加工一定数量的精加工零件，如齿轮、轴承和轴类零件。
3. 以生产方式淬火一定数量的这些零件(在未渗碳条件下)。
4. 测量从表面到心部的所有关键部位的硬度值。
5. 将这些关键部位测得的硬度值与用相同一炉次熔炼得到的且以同样的热学条件淬火得到的约米尼试棒上的某端淬(J_{eh})部位的当量硬度值进行比较。
6. 以这种方式得到J_{eh}值，定义生产淬火零件上的每个部位同等的硬度冷却条件。
7. 最后，从适合的顶端淬火数据里选取一种钢，这种钢会在其精加工生产零件的每一个关键J_{eh}部位产生所要求的硬度。如果顶端淬火数据不合适，那么通过一种标准方法计算适合的成分。

图 2.3-49　约米尼当量冷却率(J_{eh})的确定

第13节　碳素钢和合金钢的应用特性

钢的耐磨性

金属磨损是以表面和亚表层材料的塑性移位及其颗粒的脱离形成磨损碎屑的形式而发生的。金属的磨损过程可以通过与其他金属、非金属固体、流动液体或携带着实心颗粒或液滴的气流相接触而进行。

磨损也是因表面与一种或多种接触物质之间的相对运动而造成其损坏的，而且一般都是发生在磨损表面上的一种渐进式的材料缺失。它可以包括氧化、腐蚀、蠕变、疲劳、摩擦效应、连续性冲击、因粗糙表面引起的隐性切削以及因磨料颗粒的作用而引起的切削和变形。这种复杂性是很难精确处理的，故分析研究一般只能局限于磨损的某一方面。通常是考虑力学方面的影响，即由表面上直接或间接作用应力所造成的表面局部变形和金属缺失。

磨损还会引起关键尺寸的变化、振动的增加、疲劳损坏、关键通道和触点被碎屑阻塞、磨料颗粒的产生、密封容器里流体的泄漏、低效率运行和系统失效。

磨损分类

最简单的磨损分类是按照是否存在有效的润滑剂区分的——即润滑磨损和非润滑磨损（本节后面要阐述不同类型的润滑）。磨损还可以按其机理分类。例如，下面是按照《ASM手册》第18卷摩擦、润滑和磨损技术里的磨损模式的分类：

颗粒或流体引起的磨损
磨料磨损
研磨磨损
固体颗粒侵蚀
气蚀
液体冲蚀
泥浆侵蚀
滚动、滑动和冲击引起的磨损
滑动和粘着磨损
微动磨损
滚动接触磨损
冲击磨损
化学辅助磨损
腐蚀磨损
氧化磨损

按照磨损机理的分类强调的是下面中的一种或多种因素：单一原子的失落、塑性变形、塑性或脆性断裂以及切削、疲劳、粘着和化学-电化学效应。

在任何一种主要依赖于机理的标识分类方式中，都存在着一个固有的问题。滥用这种标识（也就是使用时缺乏必要的试验依据）会导致概念上的误解，目前还只是对特定磨损的状况有很好的理解。而反过来，这又影响为控制磨损做出创造性的努力。

磨损分类的第三种方法是用广为理解和接受的术语着重表述接触材料的性质及工况条件。下面是这种分类的举例：

金属对非金属磨料
高应力的刨削和磨削：
　湿的，如在球磨机和棒磨机里的
　干的，如在颚式或辊子式的矿石破碎机里的
低应力的划伤或拉伤：
　湿的，如用于湿砂的螺旋输送器
　干的，如用于干土的犁或推土装置
松散磨料的撞击（侵蚀）：
　湿的，如泥浆泵里的推进叶片所接触的
　干的，如在喷砂里的
金属对金属
滑动：
　润滑的，如发动机里的十字滑块或轴承中的轴
　非润滑的，如紧固件、螺母和螺栓
滚动：
　润滑的，如滚动轴承和齿轮
　非润滑的，如车轮与轨道
液体和水汽对金属的侵蚀
　湿流，如汽轮机
　燃气，如燃气轮机
　水，如水泵叶轮
　气蚀，如在湍流，高速液流里的

在使用中，上述工况往往是组合的，如原本为金属对金属的用途中会出现金属对非金属的工况，如由于氧化物磨料颗粒的产生和非金属颗粒通过不良的密封进入。其他组合包括滚动与滑动、润滑-非润滑组合的工况。

磨损试验及评价

对不同的研究人员所提供的磨损试验数据进行比较通常是很困难的，有可能因为某些试验条件没有说

明或因为用的就是明显不同的磨损试验。磨损试验至今还没有适当的标准化。技术文献介绍了数以百计的不同磨损试验装置和方法。其中很多都是采用简单的形式，如销-盘、块-环、环-环或圆柱体-圆柱体。还有许多其他的装置被设计成尽可能地模拟真实零件的实际运行工况。特别当设计人员很难用已公布的磨损数据对比自己的工况条件时，这也是常需要使用的方法，虽然它属于磨损试验的衍生。

尽管有大量不同的磨损试验，在滑动机械磨损的主要变量仍可以通过以下三个简单问题进行确认：

- 系统是润滑还是非润滑的？
- 大部分的磨屑能被去除掉吗？
- 磨损表面能与其他表面稳定的接触吗？

本手册的第5篇第4章中将更详细地讨论各类磨损。

磨损数据的制订。这项工作至今尚未很好的标准化，下面将讨论一些较为普通的制订方法。归纳磨损数据最简单和最广为应用的方法是关注在一定条件下，长度、体积和质量的变化（或在单位时间里对它们的相同测试）。耐磨性有时就取这些量值中一个的倒数。当然，如以这种方式表达的话，其结果就不是材料常数，因为它们还取决于试验的条件。

由几种滑动磨损的模型，推导出体积变化的预测：

$$\Delta V = kLS/3H$$

式中，L 为载荷，S 为滑动过的距离，H 为维氏硬度，而 k 是一个系数。因此，磨损率一般用 $\Delta V/L$ 报告。对于轻度磨损，k 约为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$，对于严重磨损，k 约为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$。磨损系数的定义有时也采用 $\Delta V/SL$ 或 $k/3H$。

磨损有时报告为“磨损率”或 d/pS，d 为磨损深度，p 为承受的压力，而 S 为滑动过的距离。当磨损成为寿命的主要决定性因素时，磨损值还可用于表达为使用寿命。试件磨损率一般也可以记录成为在相同的试验条件下比对标准材料磨损的相对值。这时作为标准材料，采用一种好的参照材料是必不可少的。与其他的磨损方式相比，这是惟一能以合理方式对不同材料进行排序的方法；因为金属磨耗值一般是不会一致的，即使不同的试验者尽最大努力统一试件所经受的试验条件。事实上，用同一种标准参照材料制成的不同试件在同一台试验机上以标准试验条件进行试验，所得到的金属磨耗量在其持续的试验期里的变化幅度能达到25%，而且没有任何迹象表明其试验条件发生过系统性变化。

磨损率的转变。许多材料的磨损试验都能得到磨损随载荷线性变化的结果。于是人们自然希望利用这些数据外推到更高载荷的工况里，尤其因为简单的磨损模型能预报一种线性载荷的依赖关系。然而实际上这种方法并不可靠，因为磨损率将因其显微组织、温度或其他试验条件而发生一种或多种的转变。

表2.3-91归纳列举了在一系列的销-盘磨损试验中，灰铁销磨损发生这类转变的多个例子。在低载下磨损碎屑主要为氧化物，然而在高载下其碎屑颗粒将是大小超过氧化物颗粒大约五倍的金属片状颗粒。3～4号大小的ASTM A型的片状石墨就是属于最低磨损率的两种状况，它们随机地分布在珠光体的基体组织里。从许多铁质材料中都能发现类似的磨损率随载荷转变的情况。

表2.3-91　灰铁销在销-盘试验中的磨损

铁组织		游离铁(%)	转换载荷/kg	磨耗①/g		
石墨类型	石墨大小			磨合磨损②	轻度磨损期③	严重磨损期③
ASTM A型	3～4	5	1.70	1.90	0.0	5.0
	4	10	2.10	2.90	0.016	5.0
ASTM D型，某种A型	5～6	15	3.55	1.45	0.083	13.2
ASTM E型	6～7	25	3.20	0.40	0.049	22.0

①按每公斤的载荷计。　②销端的滑动距离为6700m。　③销端的滑动距离为10000m。

白蚀层。在磨损的文献里常提及“白层”或“白蚀层”。这种白层通常比其周围材料要硬得多，但很少被明确定义任何其他特征。由于有许多类型各不相同的“白层”，从而会引起一些迷惑。例如白层会是一些在摩擦发热后迅速冷却的过程中生成的马氏体区。在另一些情况里，它可以是由特殊的表面处理而形成的氮化层，或者具有很细晶格显微组织的高形变区。

磨损碎屑。这是在磨损过程中由变得很松散的材料碎粒(不同大小和形状)所构成的。这些碎屑的结构和性质为确定磨损的类型及在其发生时所处的工况条件提供依据。

磨损碎屑也是一种磨损机理及其产生条件的一种敏感标记。当从两种不同的试验装置里产生相似的碎屑时，就可以预期两者具有相似的磨损工况。运用这个原理就可以将实际运行设备与已经公布的磨损数据信息(若磨损碎屑的信息为已知)进行比较。在这种情况下，利用磨损碎屑分析能够监测磨损的工况条件，从而为磨损失效提供预警。

磨料磨损

磨料磨损就是局部表面的接触点在与之较软的配合材料上的犁削。最常见的这种磨损是由于非金属材料引起的，但金属材料也能引起磨料磨损。一般来说，一种材料只能被比它更硬的材料严重磨伤或划伤。大部分的防止磨料磨损的方法也就基于这个规则，但是也有例外。

当在高表面载荷的作用下，如球磨、棒磨或矿石破碎机里发生擦伤时，其作用是很复杂的。磨料不断地破碎成越来越小的碎片。于是，大颗粒在力的作用下，从对表面的擦伤并使其变形的作用开始，随着其颗粒的变细和锐利而转变成切削和刮削。

磨料磨损的种类。磨料磨损可以有擦伤、高应力磨削或侵蚀和低应力刮削三种形式。

- *擦伤的磨料磨损*就是使比较粗糙的颗粒从钢的磨损表面脱落，类似于使用粗粒砂轮通过切削或磨削使金属脱落。如铲斗齿铲运送大的锐利岩石、冲击式研磨锤和一些溜槽的衬里。破碎机衬里至少也有一部分是属于擦伤磨损的。
- *高应力磨削的磨料磨损*就是使比较细的(显微级的)颗粒从磨损表面脱落。两个金属表面之间的挤压作用会将磨料压碎。单位压应力或切应力是非常高的。因此较硬的磨料，如石英具有在硬度高达65~70HRC的钢表面上压痕和划伤的能力。金属可以通过显微擦伤或局部塑性流动和显微开裂相结合的方式从表面脱落。球磨就是一种磨削的磨料磨损的好例子。在机器里，如果零件在砂砾的环境中互相摩擦就会发生这种磨损。
- *侵蚀和低应力刮削的磨料磨损*是通过与锐利的磨料颗粒之间非常轻的摩擦接触而产生的磨损。其应力主要是由速度引起的，而正常情况下还不足以使磨料发生大量的碎裂。这种例子有筛面、运送砂石的溜槽衬里、运送砂浆的零件以及暴露在大气磨料中的零件。当含有悬浮磨料颗粒的流动液体流经一个表面时，还会发生侵蚀。当液流直接冲撞表面、当流体特性在液体在表面附近引发气蚀、或由气流携带的液滴冲击表面时，液体本身都会造成侵蚀。在侵蚀的过程中还包含着腐蚀，特别是在液体里或当温度高于室温时。

磨料磨损试验。让材料在实际应用的工况条件下进行磨料磨损试验是不现实的，应当选用密切模拟实际工况条件的实验室磨料磨损试验。然而在实验室试验中必须考虑以下因素：

- 磨料所处的位置——它可以是固定的，如砂纸(双体型磨料磨损)；也可以是自由旋转的，如松散的砂子(三体型磨料磨损)。
- 主要磨料的大小、形状和硬度值(通常指混合物料中最硬的组分)。
- 在磨损过程中，相对运动的方向和速度。
- 系统里的接触压力或载荷。

为了用松散磨料模拟低应力或刮削磨损，一种橡胶轮试验被发现是很有用的。图2.3-50所示是很大范围内的材料试验结果。耐磨性最差的材料的磨损比耐磨性最好的材料的要快1500倍。

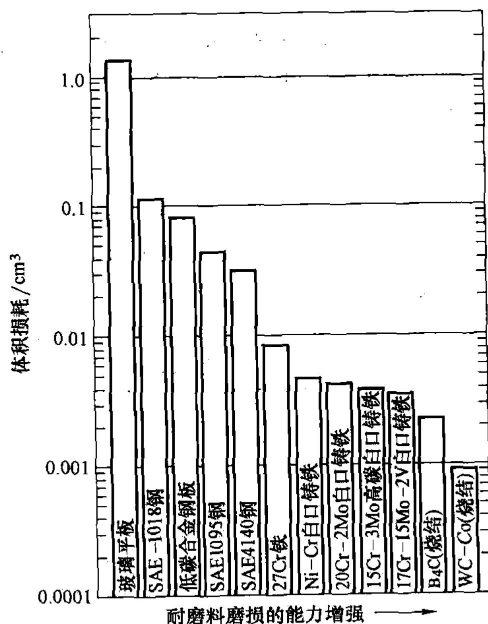


图2.3-50　按体积损耗的橡胶轮试验结果，橡胶轮正火处理至邵氏硬度为55。注意磨耗的坐标为对数坐标

不相似的磨料磨损试验之间的相关性。在某些用途里，从一种磨料试验得到的数据可用于预测在十分

不同的工况条件下的相关磨损率。例如，好几种钢和铸铁都可在橡胶轮装置里试验和采用磨料稀浆的运动方式进行试验。尽管试验的条件明显不同，但是两者试验结果的相关性却是相当好的（见图2.3-51）。这两种情形里所用磨料都是松散的和低应力的。若试验条件更加不同，则预计这种简单相关性就更难以为继了。

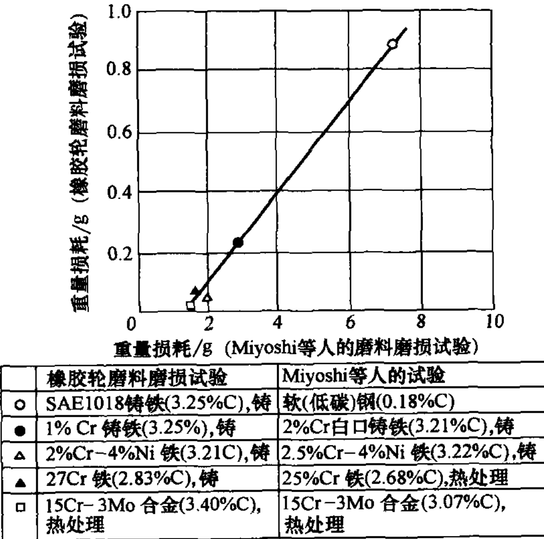


图2.3-51　橡胶轮磨料磨损试验与住友（Sumitomo）金属工业公司的磨料磨损试验结果之间的相关性

磨料颗粒的大小。内燃机进气所携的杂质是其活塞环过度磨损的一个长期性原因。适时地维护和过滤装置的设计是其主要控制手段。防止滤清器与发动机之间的泄漏也是必不可少的。润滑油被杂质污染引发的问题虽不是很多，但是机油滤清器及其密封的设计和维护有必要考虑控制其问题的发生。当发动机里的污染颗粒达到一定的大小时磨损就会减轻，杂质颗粒常会减轻而不是增加摩擦。图2.3-52所示的活塞环磨损数据表明，当颗粒的大小为20μm时，磨料磨损最为严重。显而易见，润滑油所起的润滑效果在其一个很大的粘度范围里都不会对由颗粒造成的磨损高峰产生影响。

磨料的硬度。它会明显影响磨料磨损。当磨料的硬度提高时，不同钢的磨损率的差别会缩小。相反，当磨料的硬度降低时，钢的硬度和显微组织的差别会变得更加重要。

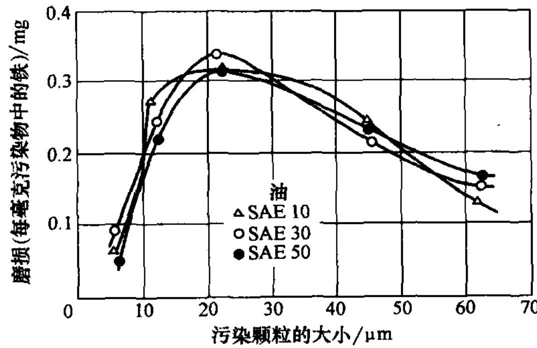


图2.3-52　污染颗粒的大小对于以三种不同粘度的油润滑的发动机活塞环磨损的影响

金属硬度。通过选择适合的金属（表2.3-92）可以部分或全部地解决磨损问题。当从最大磨损的考虑出发进行选择时，金属硬度是所考虑的最重要的特性之一。如果其他因素相对保持不变，那么针对不同金属之间的相对磨损状况，通过比较它们的硬度值将可获得大致上的选择依据，对于金属对金属的滑动和磨料磨损的用途尤其使然。然而，对于一个既定的用途而言，仅凭硬度尚不足以做出最佳的材料选择。本节的后面部分将阐述选择耐磨材料所需考虑的其他因素，其中最重要的因素之一的就是显微组织。

表2.3-92　几种钢对硬、软磨料的相对硬度和耐磨性

材料	w(C)(%)	硬度HV	耐磨性①		燧石磨料②			玻璃磨料③		
			SiC 180砂砾	Al_2O_3 180砂砾	相对硬度④	耐磨性① 180砂砾	耐磨性① 36砂砾	相对硬度④	耐磨性① 180~200砂砾	耐磨性① 30砂砾
1.6Ni-1.1Cr-0.26Mo钢，淬火并回火	0.37	352	—	1.47	0.735	1.40	—	1.32	1.95	—
		433	—	1.60	0.730	—	—	1.31	3.04	—
		498	1.62	1.55	0.828	1.49	1.69	1.49	2.81	1.86
		626	1.96	1.87	1.03	2.01	—	1.85	200	26.0

（续）

材料	w(C)(%)	硬度HV	耐磨性①		燧石磨料②			玻璃磨料③		
			SiC 180砂砾	Al_2O_3 180砂砾	相对硬度④	耐磨性① 180砂砾	耐磨性① 36砂砾	相对硬度④	耐磨性① 180～200砂砾	耐磨性① 30砂砾
碳素弹簧钢，淬火并回火	0.43	174	—	1.31	0.509	—	—	0.914	1.57	—
		344	1.47	1.44	0.626	—	—	1.12	1.87	—
		590	1.84	1.74	0.875	1.87	2.01	1.57	—	—
		688	1.75	1.85	0.968	1.87	1.87	1.74	∞	113
	0.74	221	—	1.42	0.645	1.45	—	1.16	1.96	1.56
		503	1.75	1.70	0.849	1.71	—	1.53	4.98	2.24
		650	2.03	1.86	0.950	2.35	2.19	1.70	∞	69.4
		813	2.51	2.32	1.18	3.07	2.93	2.12	∞	—
奥氏体18Cr-10Ni不锈钢	0.06	158	1.80	1.65	0.610	1.65	—	1.10	1.63	—
奥氏体12%Mn钢	1.20	220	2.17	2.11	0.850	2.39	—	1.53	41.2	5.78
阿姆柯(Armco)锭铁	<0.02	100	1.00	1.00	0.378	1.00	1.00	0.680	1.00	1.00

①参照材料的磨耗体积除以试验材料的磨耗体积，参照材料：阿姆柯(Armco)锭铁。　②1060HV。　③590HV。
④HV_μ/HV_a。其中，HV_μ为研磨面上的最大维氏硬度，HV_a为磨料的维氏硬度。

下面的例子表明，硬度是在各种特定用途中控制不同材料耐磨性的关键性因素。

*例1：磨削球磨损。*含有（质量分数）0.8% C、0.70% Mn、0.30% Si、0.20% Cr、0.15% Mo以及0.002% B的低合金马氏体钢（水淬至60HRC）和含有（质量分数）0.8% C、0.70% Mn和0.30% Si的珠光体钢（经油淬成细珠光体组织并至40HRC）的磨削球，这两种材料的比较如图2.3-53a和b所示。球在放入球磨机后不允许有停机时间，因此选择材料所依据的是与磨损率相比的每磅成本及其可行性。低合金马氏体球每磅

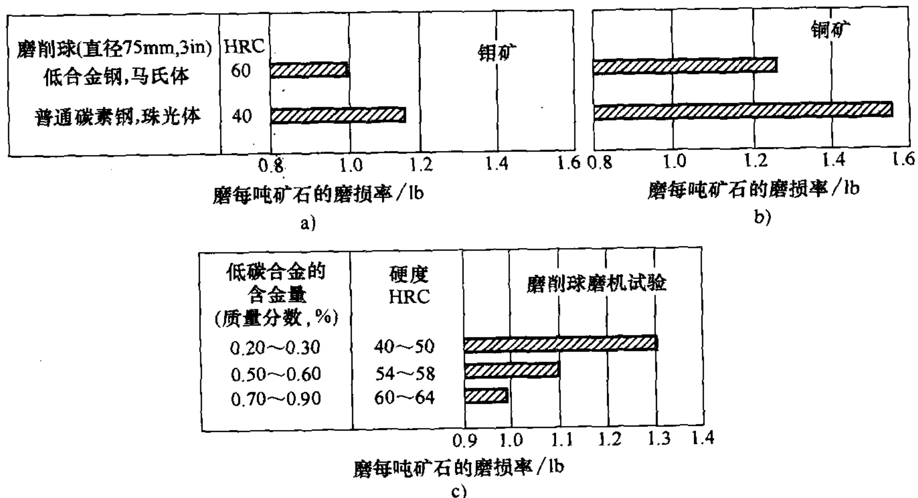


图2.3-53　直径为75mm(3in)钢磨削球的成分、硬度及被磨材料对其磨损率的影响

的成本虽较高，但是其高耐磨性证明，它在这种以及许多其他的应用中还是物有所值的。

在如图2.3-53c所概括的另外一系列的试验里，对经完全淬硬的不同含碳量的三种低合金钢球进行了比较。它们的成分(质量分数)和硬度如下所列：

- 低碳钢：0.25% C、0.90% Mn、0.30% Si、0.60% Cr、0.20% Mo以及0.002% B，硬度为40~50HRC。
- 中碳钢：0.55% C、0.90% Mn、0.25% Si、0.30% Cr、0.05% Mo以及0.001% B，硬度为54~58HRC。
- 高碳钢：0.80% C、0.70% Mn、0.30% Si、0.20% Cr、0.15% Mo以及0.002% B，硬度为60~64HRC。

润滑和润滑磨损

润滑油的使用能减少多种形式的磨损。润滑剂起到一种隔离摩擦表面的作用，以此避免或大大减少金属与金属的接触。如果配合表面是平滑的(除显微微凸体外)，那么容易实现完全隔离。润滑剂还能像运输车一样，把产生的松散磨损碎屑在其发生磨料磨损之前就从摩擦区域运走。特别在下面的系统里，润滑剂还能控制因摩擦热而引起的温度的升高。

流体动力润滑。它形成于流体粘性在作相对运动的两个表面之间的剪切过程中，产生足够的流体压力将两个表面分隔开并承担载荷。当流体在压力作用下流经一个逐渐收缩的楔形通道时，就会产生流体动力的效应。在滑动轴承中的这种润滑是由旋转的轴颈将油膜拽进一个逐渐收缩的楔形通道里形成的，该通道又是轴颈中心在力的作用下相对轴承中心发生一个偏移而产生的。在流体动力润滑的过程中，表面之间的分隔足以让表面上的微凸体不发生任何接触。轴承的摩擦与流体的粘度和表面速度成正比。最小油膜厚度也与粘度和表面速度成正比。流体动力润滑也称为“厚膜”和“流体膜”润滑。

静压润滑。这是指一种状态，即提供的润滑剂在足够大的压力作用下将表面分隔开。

弹性流体润滑。指的是由高速滚动接触形成的一种流体油膜润滑。滚动体之间的接触区是由一种薄的润滑油膜(小至0.25μm)分隔开的，流体动力润滑状态就存在于这种薄油膜里。在集中接触下，如球与滚道间的接触，假设在其接触区存在着一种赫兹压力分布，并假设因弹性变形而形成一个平的接触区域，那么流体油膜隔在两个近似平行的表面之间，位于流体动力油楔和弹性变形区的入口处状态就是一种使流体承受高压和高剪切率的工作状态。这种状态改变流体的表观粘度(随压力而增加的粘度)。弹性流体动力润滑要求非常低的表面粗糙度，以防止微凸体的接触。

边界润滑。这是表示在重载或剪切率太低而导致动力油膜破裂而形成的一类接触状态。固体表面的接触发生在吸附着的软表面膜之间。这种表面膜是一种有方向性的长链脂肪酸分子的排列，它具有足够的防穿刺能力，以此避免金属与金属的接触。它们还有较低的与表面相平行的剪切阻力，因此使滑移接触保持合理的摩擦特性(摩擦因数为0.05~0.1)以及轻度的磨损。这时摩擦也不再是粘度和表面速度的函数。边界润滑通常也包含一些金属对金属的接触，其边界膜可以是物理吸附膜或化学吸附膜，这种膜也是在润滑的环境中形成和得到补充的。边界润滑的维持在很大程度上取决于润滑表面的表面化学和运行状态。

固体润滑。它描述的是一种以软固体代替流体润滑剂的状态。固体润滑剂粘附于摩擦表面，并且形成一种低剪切强度的固体膜。天然的固体润滑剂包括石墨和MoS_2。一旦润滑剂的固体膜得以建立，它就有可能被磨去，除非能连续得到补充。这种软固体就像树脂或无机粘结剂中的色素一样悬浮于固体润滑剂涂层里面。许多有效的固体润滑剂都具有层状结构，然而这并不能作为固体润滑剂的分类的先决条件。

干磨损。一般是指没有从润滑中获益的表面间磨损。在一定的载荷、速度、表面粗糙度和温度的条件下，甚至在有润滑剂存在时，都会发生干磨损。干摩擦会导致温度的上升，并足以改变其显微组织和力学性能，能通过热处理获得硬度和强度的材料也最有可能受摩擦热的影响。在干磨损的过程中，真正达到的表面温度实际上是不可能测量到的，这种温度本身及其测量方法都一直是有争议的。

钢的耐磨性选择

磨损问题的解决全部或部分地依靠材料的正确选择。应力分析和实验室研究通常只能提供部分的解决，而很少能彻底解决磨损问题。通常选择一种材料进行试验，将其制成试验或实际使用的零件、使其运行并考察其磨损率。如果在这样一种有限的使用中证明其优异的性能，那么零件可以进入生产模式并在不同的条件下运行，以此进一步地观察和记录其寿命和适用性。

软(低碳)钢在干滑过程中所表现的耐磨损和抗表面破损性能都是很差的。用于滑动接触表面的软钢都要求进行表面处理，如表面硬化或镀层处理，和/

或选择一种“兼容性”材料与之匹配，如青铜或巴氏合金。若让钢与硬矿石接触，它将磨损得非常快，除非钢的表面经硬化或用非常硬的材料进行镀层。

钢在腐蚀环境中会加速磨损。未经防护的钢对于介于两个低幅震荡接触表面之间的微动磨损破坏或氧化磨损碎屑的形成也是很敏感的。钢或铸铁经过热处理有可能形成相差迥异的各种显微组织。磨损性质是与特定的显微组织相关的。

相对成本。当根据耐磨性选择钢时，必须考虑钢及其热处理的总成本。以下依照总成本增加的顺序列出了在特定用途中具有适用耐磨性的钢种：

- 低碳钢，如1020，不经热处理。
- 简单高碳钢，如1095，不经热处理。
- 直接硬化的碳素钢或低合金钢，用感应或火焰方法进行整体或表面淬火。
- 低碳或低合金钢，通过渗碳、氰化或碳氮共渗进行表面硬化。
- 中碳铬或铬-铝钢，通过渗氮硬化。
- 直接硬化的高合金钢，如D2高碳、高铬工具钢(1.50% C、12% Cr(质量分数))，里面含有游离碳化物颗粒。
- 析出硬化不锈钢(主要用于存在热或腐蚀(或两者同时)以及磨损的用途里)。
- 用粉末冶金或机械合金化技术制造的特种钢。
- 用钢基烧结的碳化物硬质合金。

其他铁质合金，如高锰奥氏体钢和不同种类的铸铁都广泛应用于抗磨的用途里(见本章第11节)。

淬硬区的深度。制动块、磨棒、溜槽衬里及一些类似的零件，在其更换前都可以使截面磨到相当小的程度。对于这些零件而言，较贵的深淬硬钢比浅淬硬钢可能更加经济一些。例如一根直径为64mm(2½in)、表面硬度为50HRC的圆棒可以用1040水淬或用5160油淬制成，然而当圆棒磨到原来直径的四分之三(大约为48mm或1⅞in)时，1040钢的表面硬度为25HRC，而5160钢在同样部位的硬度为37HRC，而且前者磨损的速度比后者也快得很多。

韧性。耐磨性趋向于随硬度的提高而提高，但会随韧性的提高而降低。对于同时要求耐磨性和耐冲击性的用途，这是一个很重要的关系。

图2.3-54所示是不同铁质合金的耐磨性与韧性之间的关系。因为显微组织的影响，其离散性至少会部分地提高。例如，点22B(见图2.3-54)指的是AISI4340钢，淬火并从高温约650℃(1200℉)回火，得到铁素体基体上的细碳化物。点22A代表的是同样的钢，只是经正火产生细珠光体；点22C代表淬火的试件从相对较低的温度205℃(400℉)回火。在图2.3-54中，较下面的一条带上的钢综合了韧性与耐磨性，它们主要为奥氏体锰钢。图2.3-54还表明，对于大部分铁质合金都要在耐磨性与韧性之间进行权衡。对于某些合金，改变含碳量则是一种调整这些性能的简单方法。

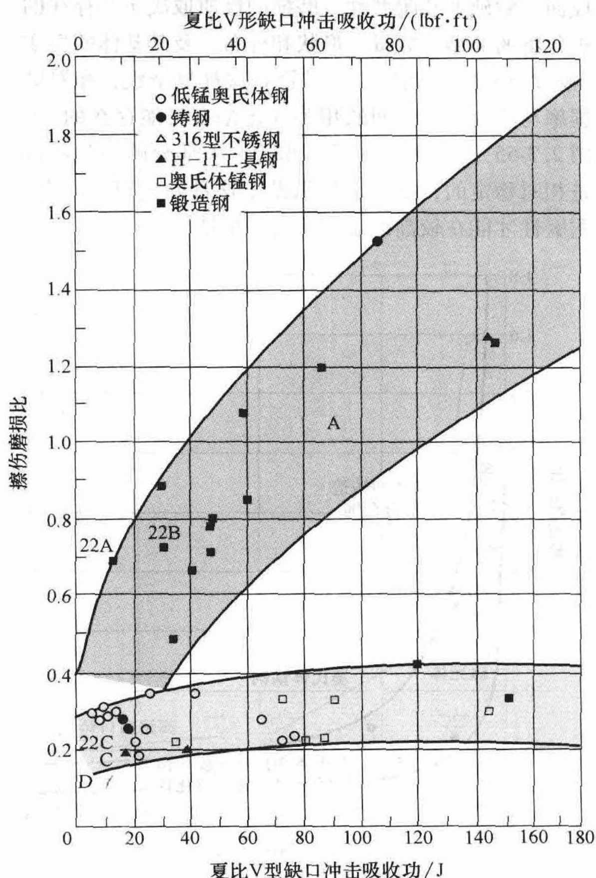


图2.3-54　不同材料的耐擦伤磨损与韧性之间的关系。区域A，锻造和铸造的低合金钢；区域B，奥氏体锰钢；区域C，不同的热处理钢；区域D，高-铬-白口铸铁

含碳量。铁素体钢可以通过整体或表面的硬化改善其耐磨性。最高硬度取决于钢的含碳量和马氏体量(淬火的有效性)。这种关系在本章第12节中阐述过了(见图2.3-50)。

标准的硬度测试可以表明，作为一种马氏体钢尽管还遗留了一些奥氏体，但基本上已转变完成。超低温处理(再经过回火)有助于马氏体的完全转变和耐磨性的提高。由于马氏体是一种亚稳定组织，所以随着温度的升高它开始转变为更为稳定的其他组织，因此马氏体钢不适用于要求高温下的耐磨性或摩擦热会显著提高温度的用途里，也不应当用于温度超过200℃

(390℉)的用途里。特种合金钢，如工具钢或马氏体不锈钢都能适用于较高的温度。当零件表面产生热效应区时，其最终加工(如磨削)也应考虑马氏体的这种热不稳定性。最后的回火效果会发生局部化或泛化，但是无论在哪一种情形里都可能降低耐磨性。

含碳量还会通过简单和复杂的各不同碳化物的生成而影响硬度和耐磨性。磨损的性质取决于所存在的碳化物的类型、数量、形状和分布，及其基体的性质(硬度、韧性和稳定性)。尽管有这种复杂性，相对磨损率与其含碳量之间的相关性还是有可能存在的(见图2.3-55)。因为与马氏体相比，大部分的碳化物都是相对稳定的，所以正是借助于这种硬的显微组分，耐磨性才能在较高的温度下得以保持。

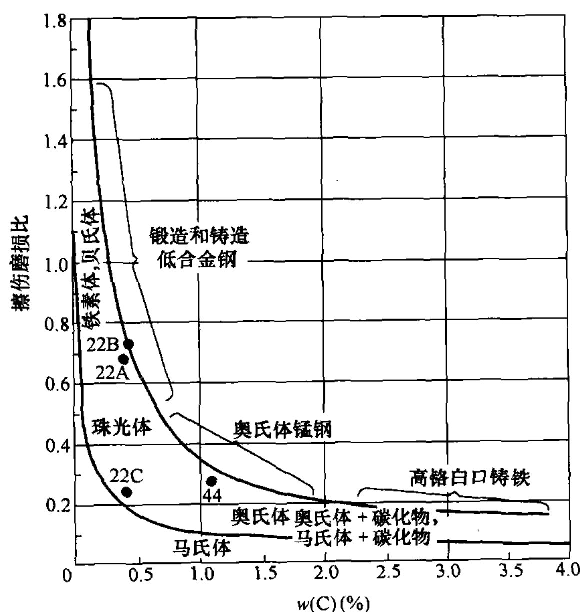


图2.3-55 不同类的钢和铸铁的擦伤磨损与含碳量之间的关系

硬度和显微组织。整体硬度常用于作为磨料磨损耐磨性的参照，对此可以从图2.3-56所示的经退火的非合金金属的数据得到印证。这些数据是用砂布(双体磨料磨损)的磨损试验得到的，砂布上的磨粒硬度远大于金属试件。图中的数据点都是近似的，测量值的试验离散性并未出示。

与硬度有关的一些其他性质(如弹性模量)也存在着相应的相关性。在所有的情形里，如果金属不是合金，也都可获得一种简单的相关性用于控制双体的磨料磨损试验。可以期待不同的晶体结构产生不同的相关性，但图2.3-56的数据并没有示出这些影响。

若要将这些简单的硬度相关性沿用到一些含有杂质或溶质的金属、或更为复杂的合金里时，必须格外小心。图2.3-57示出了不同种类的金属的耐磨

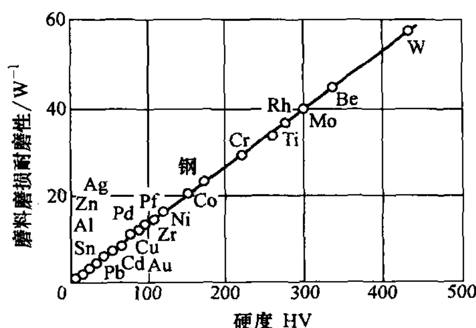


图2.3-56 经退火的非合金金属和钢的磨料磨损耐磨性与硬度的关系

性与其硬度是如何相关的。图2.3-56中的纯金属的线性关系在图2.3-57重复成为一条陡峭的直线。不难理解，另外一条直线是用于表示脆性陶瓷的。这两条不一样的直线可以用它们的不同熔结类型来予以说明。

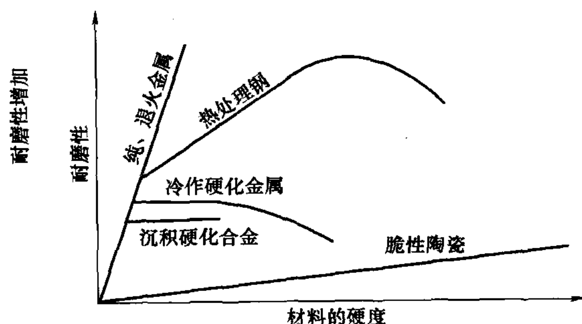


图2.3-57 简图表示耐磨性与不同材料在不同显微组织条件下硬度之间的关系

磨损与显微组织

前面的讨论已经说明了硬度与显微组织作为耐磨因素的重要性。从冶金学上看，硬度与显微组织一般是相互关联的。例如碳素钢的含碳量增加引起显微组织的改变，由此又提高淬火后的硬度，并降低其塑性或韧性。

硬度不变时的耐磨性。关于不同的钢在硬度不变条件下的耐磨性比较试验见诸于报道的非常少。然而一系列在重载下抗咬合性的试验表明，当热处理达到40HRC时，选择不同的钢就能够得到大范围的力学性能及其显微组织。表2.3-93中所列的钢包括一种普通碳素钢、一种工具钢、一种合金钢、一种马氏体不锈钢、两种析出硬化钢和一种马氏体时效钢。有关其热处理以及不同显微组织的详细阐述如表2.3-93所示。

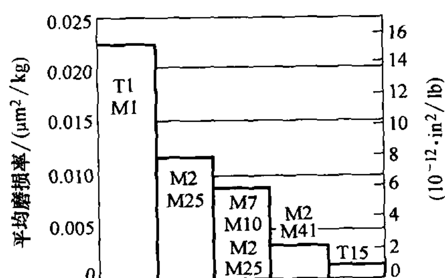
表 2.3-93 用于抗咬合试验的钢

钢型号	热处理	热处理规范	显微组织表述
1040	调质	830℃(1525℉), 20min, WQ, 415℃(780℉), 4h, AC;	回火马氏体及极细碳化物分布
W1(Ⅰ)	调质	790℃(1455℉), 20min, WQ, 440℃(825℉), 4h, AC;	回火马氏体及极细碳化物分布
W1(Ⅱ)	调质	900℃(1650℉), 20min, OQ; 470℃(880℉), 4h, AC	回火马氏体基体里的初生碳化物(4~8μm)
4340	调质	830℃(1525℉), 20min, OQ; 485℃(905℉), 4h, AC	回火马氏体及极细碳化物分布
440C	调质	1065℃(1950℉), 20min, OQ; 580℃(1075℉), 2h, AC	回火马氏体基体里的大初生碳化物(20μm)
15-5PH	固溶处理并时效	1040℃(1905℉), 30min, OQ; 530℃(985℉), 4h, AC	马氏体
17-4PH	固溶处理并时效	1040℃(1905℉), 30min, OQ; 530℃(985℉), 4h, AC	马氏体基体里的δ-铁素体
18Ni(250)(Ⅰ)	固溶处理并不足时效	815℃(1500℉), 60min(真空), AC; 320℃(610℉), 2h, AC	板条马氏体
18Ni(250)(Ⅱ)	固溶处理并过度时效	815℃(1500℉), 60min(真空), AC; 630℃(1165℉), 2h, AC	板条马氏体和极细的逆变奥氏体

注：WQ，水淬；OQ，油淬；AC，空冷；
引自参考文献[12]。

碳化物对磨损的影响。钢显微组织中碳化物的数量、大小和分布对耐磨性有着各不相同的影响。对于大部分的零件，耐磨性随磨损表面的碳化物颗粒数量或大小的增加而得以提高。这种效果更多地取决于碳化物在表面积上所占的比例，而且当擦伤磨料磨损不作为考虑的因素时，这种效果就显得更为突出。以下的这些例子说明碳化物在不同磨损用途中的作用。

例2：碳化物对于高速工具钢磨损的影响。用几种不同高硬度的高速钢试件在交叉圆柱滑动试验台架上进行试验。固定的圆柱体是用碳化钨(6% Co)制成的，转速为40000r/h，作用的载荷为68kg(15lb)。滑动的距离范围为$1\times10^{-5}\sim5\times10^{-5}$in。所有四种钢的整体硬度值都在65~67.5HRC的小范围里。然而如图2.3-58所示，磨损率的变化相当大。主要的因素似乎是含有硬MC-型的碳化钒(2800HK)，这个硬度在T15钢中是最高的，而在T1和M1钢中则是比较低的。



钢种或牌号	化学成分(质量分数,%) C	V	总碳化物	MC-型碳化物	硬度HRC
T1、M1	0.75	1	29	2	65
M2、M25	0.85	2	28	3	65
M7、M10、M2、M25	1.0	2	26	4	66
M2、M41	1.1	2	28	4.5	67.5
T15	1.5	5	32	10	67.5

图 2.3-58 高速钢的磨损率

硬度的评定

除了某些例外的情况，本文所提供的数据都已表明，硬度是控制钢磨损的最重要因素。传统的硬度评定方法，如洛氏和布氏测定并不总能提供足够的信息，或者对微小但又重要的异常变化不够敏感。少量的残留奥氏体、脱碳、显微组分变化和其他因素并非总能用常规硬度测试方法进行评定，但是它们对耐磨性却有明显的影响。

显微硬度的测试。这对于检测局部的硬度差异是较为有效的。从试件的抛光横向截面上取点测硬度，所测出的状态是其他方法无法做到的。

钢的高温性能

碳素钢和低合金钢能广泛应用于高温中，如燃油发电装置、飞机动力装置、化工厂和石油炼厂。此处“高温”一词指的是高于室温的任何温度。如同本节所提及的用于碳素钢和低合金铬-钼（Cr-Mo）钢的“高温”，主要指的是温度的范围几乎在370～650℃（700～1200℉），在这个温度范围里，碳素钢和Cr-Mo钢的性能有着相当大的变化。

像蒸汽发电厂和汽轮机厂的一些装置，随着运行温度的升高就能提高其工作效率。这些设备能够运行的最高温度受限于其制造所用材料的承受能力。钢在高温下的抗其性能下降的能力往往随合金含量的增加而得到增强，钢的成本也随合金含量的提高而增加。因此用于高温的钢材选择也就是获得在较高温度下运行的效率与包括材料、制造、备件更换以及停机损失在内的设备成本之间的权衡。

碳素钢

碳素钢由于其成本低廉、力学性能的通用性以及易制造性而广泛用于制造压力容器。它也是炼油厂和化工厂温度从－29～425℃（从－20～800℉）的非腐蚀环境中最为常用的材料。虽然ASME的锅炉和压力容器规程（BPVC）规定了温度超过425℃（800℉）的许用应力，但它还指出长时间地处于这种温度里，会导致碳化物相转变成为石墨。这种所谓的“石墨化”现象是一种累积过程，并取决于处于425℃（800℉）或以上温度的时间。钢在高温中放置后的结果是其性能弱化。碳素钢在370℃（700℉）以上还逐渐遭受蠕变的影响。

耐热 Cr-Mo 钢

相对碳素钢和大部分的低合金钢而言，Cr-Mo钢具有优异的强度、韧性和耐腐蚀性，尤其适用于由高温零件组成的结构中。用Cr-Mo钢制成的零件应用于石油、石化、燃油发电以及纸浆和造纸工业。这种钢应用最多的是在316℃（600℉）或更高的温度下，尤其当使用碳素钢会明显发生蠕变、石墨化或氢蚀时。

就像大部分的钢一样，Cr-Mo钢适合热处理发挥作用。一种化学成分的Cr-Mo钢经过不同的热处理会产生多种的强度类型。低铬Cr-Mo钢具有中等的淬硬性。在冷却过程中缓慢冷却和等温退火，产生能长期稳定的铁素体-珠光体的显微组织，但是其抗拉强度和韧性会相对低一些。快速冷却和强化冷却会产生贝氏体，有可能使强度和韧性提高。中铬Cr-Mo钢有中等的淬硬性，空冷一般也足以能在150mm（6in）或以上的厚度里产生贝氏体。贝氏体钢通常要经过回火。高铬Cr-Mo钢具有优良的淬透能力，空冷能在大多数的厚度里产生马氏体。这种钢允许加速冷却，但是必须注意防止裂纹。马氏体钢都需要经过回火。

化学成分和冶金学。作为耐热材料的Cr-Mo钢名义化学成分如表2.3-94所示。其钢的范围（质量分数）从0.5%～12%Cr和0.5%～1%Mo。产品的类型包括管材、管道、锻件、管接头、厚钢板和铸件，焊接管和管道都包括在内。根据产品，用于压力边界条件下的最高使用温度范围为480～650℃（900～1200℉）。

表2.3-94 用于高温用途里的Cr-Mo钢一览表

名义化学成分（质量分数,%）	ASTM技术规范	产品形式	美国编号	最小极限强度或极限强度范围		最小屈服强度		最高使用温度	
				MPa	ksi	MPa	ksi	℃	℉
½Cr-½Mo	A335 P2	管件	K11547，K12143	380	55	205	30	540	1000
	A230 T2	管件	K11547	414	60	205	30	540	1000
	A182 F2	锻件	K12122	485	70	275	40	540	1000

（续）

名义化学成分（质量分数,%）	ASTM技术规范	产品形式	美国编号	最小极限强度或极限强度范围		最小屈服强度		最高使用温度	
				MPa	ksi	MPa	ksi	℃	℉
1Cr-½Mo	A387 Gr12/C11	厚钢板	K11757	380～550	55	220	33	650	1200
	A213 T12	管件	K11562，K12062	415	60	220	32	650	1200
	A387 Gr12/C12	厚钢板	K11757	450～585	65	275	40	650	1200
	A182 F12/C12	锻件	K11564	485	70	275	40	650	1200
1¼Cr-½Mo-Si	A182 F11/C11	锻件	K11597	415	60	205	30	650	1200
	A387 Gr11/C11	厚钢板	K11789	415～585	60	245	35	650	1200
	A187 F11/C12	锻件	K11572	485	70	275	40	650	1200
	A387 Gr11/C12	厚钢板	K11787	515～690	75	310	45	650	1200
2¼Cr-1Mo	A182 F22	锻件	K21590	415	60	205	30	650	1200
	A217 WC9	铸件	121890	485～655	70	275	40	650	1200
	A182 F22/C13	锻件	K21590，K21390	515	75	310	45	650	1200
2¼Cr-1Mo-¼V	A182 F22V	锻件	K31835	585～760	85	415	60	480	900
2¼Cr-1.6W	A213 T23	管件	—	510	74	400	58	650	1200
3Cr-1Mo	A199 T21	管件	K31545	415	60	170	25	650	1200
	A213 T21	管件	K31545	415	60	205	30	650	1200
	A336 F21/C13	锻件	K31545	515	75	310	45	650	1200
3Cr-1Mo-¼V-Ti-B	A182 F3V	锻件	K31830	585～760	85	415	60	480	900
5Cr-½Mo	A213 T5	管件	K41545	415	60	205	30	650	1200
	A336 F5A	锻件	K42544	550～725	80	345	50	650	1200
	A182 F5a	锻件	K42544	620	90	450	65	650	1200
5Cr-½Mo-Si	A213 T5b	管件	K51545	415	60	205	30	650	1200
5Cr-½Mo-Ti	A213 T5c	管件	K41245	415	60	205	30	650	1200
9Cr-1Mo	A213 T9	管件	K81590，K90941	415	60	205	30	650	1200
	A182 F9	锻件	K81590	585	85	380	55	650	1200
	A212	铸件	J82090	620	90	415	60	650	1200
9Cr-1Mo-V	A182 F91	锻件	S50460	585	85	415	60	650	1200
9Cr-2W	A213	管件	—	620	90	440	64	650	1200
12Cr-2W	A213	管件	—	620	90	400	58	650	1200

½Cr-½Mo 钢按照三种强度标准生产，并由 ASME BPVC 锅炉压力容器标准批准，其使用温度可以达 540℃（1000℉）。1Cr-½Mo 和 1¼Cr-½Mo 钢也按照三种强度标准生产，所批准的使用温度达 650℃（1200℉）。¼Cr-½Mo 钢是使用最广的 Cr-Mo 钢，但是能获得有关资料信息最多的还是 2¼Cr-1Mo 钢。锻造 2¼Cr-1Mo 钢也按照若干强度标准生产。退火钢（级别 1）的大部分都是铁素体-珠光体的显微组织，尽管往往贝氏体还存在。级别 1 钢在电力工业中应用于使用温度达 650℃（1200℉）的过热器/再热器的管材、集气管和蒸汽总管线。经过正火和回火的钢（级别 2）是一种在石油和石化工业里用于温度为 480℃

(900°F)的厚壁压力容器。在欧洲和亚洲，级别2材料常在电力工业里用于温度650℃(1200°F)的管道和管线。淬火-回火的2¼Cr-1Mo钢也是存在的。这些钢都要被用于厚壁压力容器，但是因为其对氢蚀的敏感性而只能在低于发生蠕变的温度里使用。3Cr-1Mo钢以两种强度应用，并且具有能跟2¼Cr-1Mo钢相比拟的强度性能，但其耐氢蚀的能力有所提高。

近来，加钒的2¼Cr-1Mo钢和3Cr-1Mo钢在工业上开发应用于高温压力容器及管道。这种含钒钢比不含钒钢具有更好的强度和耐氢蚀性。以钒改性的2¼Cr-1Mo钢和3Cr-1Mo钢已在厚壁压力容器中得到应用。在加入钛、铌、钙及类似的元素后，得到进一步改进的3Cr-1Mo-¼V钢也已在生产。这些钢的强度和韧性都能与表2.3-93所列的钢相比拟。

纯9Cr-1Mo钢已获准用于温度至650℃(1200°F)的锅炉和高压容器，但是其应用尚未推广。然而，20世纪80年代后期开发的9Cr-1Mo-V钢已作为管材、管道、锻件和铸件，用于电力、石油和石化工业中的不同用途里，而且已经在蠕变温度中存在累积长达15年了。

甚至近些年来，钨作为一些钼的替代品用于改善Cr-Mo钢的焊接性和韧性。这类钢包括2¼Cr-1.6W钢、9Cr-2W钢和12Cr-2W钢的三种。含钨钢中含有0.5%Mo和0.25%V，它们在蒸汽管线中被用于过热器/再热器的管材和管道。

高温下的力学性能

在高温下，钢的许可设计应力受制于不同的力学性能，这还要取决其用途和所处的温度。对于低于蠕变温度范围的用途，将由预期使用温度里的抗拉强度和屈服强度确定其许用应力。在蠕变温度范围内，许用应力则由蠕变断裂性能或蠕变变形的程度决定。近年来，全世界对于高温零件寿命延长的兴趣已促成对于高温疲劳的强烈兴趣。因此人们正致力于蠕变-疲劳之间的相互作用对于零件高温寿命影响的试验及其评价方法。

塑性和韧性也是重要的考虑，虽然塑性和韧性通常并未直接成为设定许用应力的依据。在高温用途里，塑性和韧性在大小和性质上难以保持固定不变，而常随着时间或与温度相关的时间而变化。这种变化本应是有益的，但它常是有害的；而且，在其使用温度和由于关机而在其环境温度中的这种变化都要受到重视。塑性还是影响缺口敏感性和蠕变-疲劳相互作用的一个重要因素。

评价高温下的力学性能的最常用的试验类型包括：

- 短期高温试验。
- 长期高温试验。
- 高温长期放置后的短期和长期试验。
- 疲劳试验(包括热疲劳和热冲击试验)。
- 与时间有关的疲劳试验。

短期高温试验。短期高温试验包括高温拉伸试验(由ASTM E21描述)、弹性模量试验(ASTM E231)、压缩试验、销型承载试验和热硬度试验。用拉伸试验确定的力学性能包括极限抗拉强度、屈服强度、伸长率和断面收缩率。因为高温拉伸性能对于应变率的敏感性，所以在进行这类试验时要仔细控制应变率。退火2¼Cr-1Mo钢试件在不同的温度和应变率范围下，从$2.7\times10^{-6}\sim144s^{-1}$所获得的拉伸试验结果如图2.3-59所示。

在设计采用低合金钢制造并在高达370℃(700°F)的温度里使用的零件时，它们在最高使用温度下的屈服强度和极限抗拉强度跟它们在室温下所设计使用的零

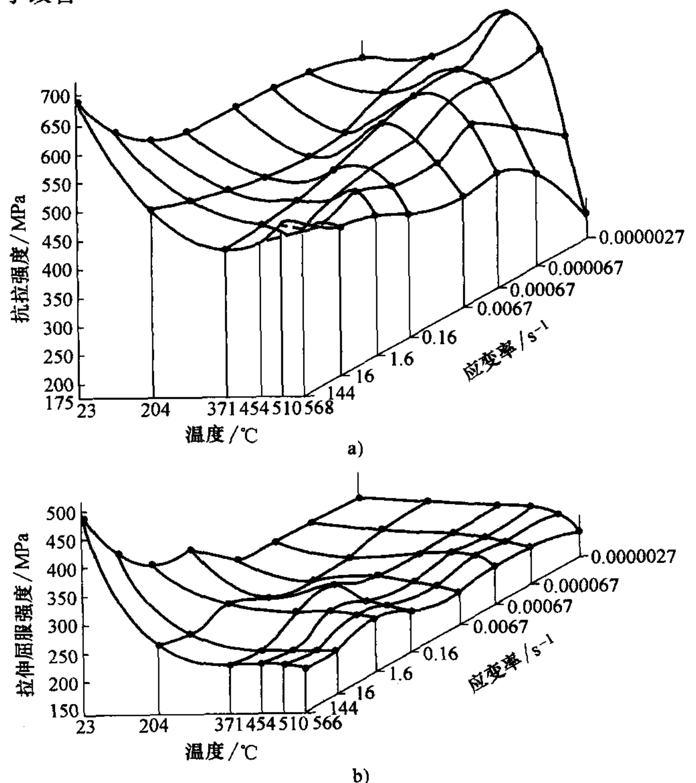


图2.3-59　试验温度和应变率对退火的2¼Cr-1Mo钢性能的影响。2¼Cr-1Mo钢在不同温度和应变率的条件下的抗拉强度和屈服强度

a) 抗拉强度　b) 屈服强度

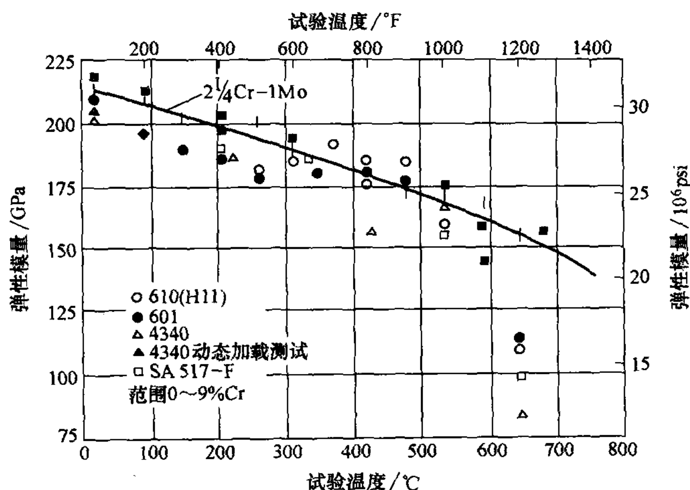


图2.3-60 温度对几种常用于高温的钢的弹性模量的影响。通过测试试件的自然频率进行弹性模量的动态测试，在拉伸试验中进行静态测试件得到同样多的应用。一些设计规范要求，在许用应力的计算中要使用合适的系数。

高温下的弹性模量值可以在拉伸试验或动力学试验过程中，通过在指定温度中测量的试棒固有频率来确定。图2.3-60所示是几种低合金钢从室温到650℃(1200℉)的弹性模量值，都是通过在静态拉伸加载或动态加载过程中测定的。

压缩试验和销型承载试验(ASTM E209和E238)可以用于评价材料在高温下承受这种类型载荷的应用。热硬度试验可用于评价在高温下使用的材料，并且能够将在室温里用的硬度试验方法用于判定材料的合格与否。

许多在高温中使用的零件都可以用焊接进行连接。焊缝金属和热影响区的高温性能都可以用与评价基体金属性能相同的方法来确定。

长期高温试验。它们用于评价蠕变效应，蠕变的定义是在高温下因不变载荷的作用而产生的与时间相关的应变速率。蠕变是要在高于370℃(700℉)的温度中观察的。一般来说，蠕变都是发生在略高于金属或合金的重结晶温度中，在这种温度里原子变得足够灵活而使其组织而得到与时间相关的重组。随时间蠕变会导致过度的变形以致发生断裂，此时其断裂应力还远小于在室温下和在高温短期拉伸试验中发生断裂所达到的应力。

典型的蠕变特性分为三个不同的阶段，如图2.3-61所示。作用载荷的即时效应会造成一种初始的弹塑性应变，接着是一个应变速率逐渐降低的塑性应变增加期(第一阶段或初期蠕变)。在此初始蠕变期之后，就是蠕变应变以一种最小的、几乎不变的塑性应变速率不断增加的蠕变应变期(第二阶段或二期蠕变)。这个名义上不变的蠕变速率就是一般所谓的最小蠕变速率，被广泛应用于研究和工程分析。最后，则是应变速率急剧增加期，并且迅速发展为断裂(第三阶段或三期蠕变)。三期蠕变没有明显的起始，但是它确实是导致断裂的发展加速期。

在与蠕变曲线有关的所有参数中，对于工程应用最重要的是蠕变速率和达到断裂的时间。这些参数都是通过长时期的高温试验测试得到，包括蠕变、蠕变-断裂和应力断裂试验(ASTM E139)以及缺口试棒断裂试验(ASTM E292)。此外，松弛试验(ASTM E328)也常用于评价蠕变特性对螺纹钢的高温性能的影响。

当变形的速率或程度成为制约因素时，则以发生初始瞬态蠕变后的最小(二期)蠕变速率和设计寿命作为设计应力的依据。使一种合金产生规定的最小蠕变速率或使其在给定的时间内产生规定的蠕变变形量(如在100000h内产生1%的总蠕变量)的应力称为该合金的极限蠕变极限或极限应力。不同低合金钢的典型蠕变极限如图2.3-62所示。

当将断裂作为其制约因素时，则要在设计中使用应力断裂值。图2.3-63所示是不同的低合金铬-钼钢的应力断裂值。

对于出现明显三期蠕变之前就发生失效的那些合金，使用带缺口的试件或同时用带缺口和光滑截面的试件(带缺口的截面积等于光滑的试验截面积)是有用的。如果材料对于缺口是敏感的，那么带缺口的试件先于光滑的试件发生破坏。很多年来，人们已经认识到缺口敏感性是与蠕变塑性有关的，故建议为防止缺口敏感性，要求保持以约10%的断面收缩率作为光滑试棒的最小蠕变塑性。关于在高温下低合金铁素体钢的缺口应力-断裂性能，已经发表了为数不多的

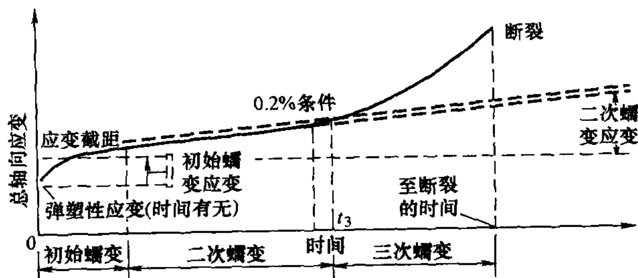


图2.3-61 典型的蠕变性状示意图

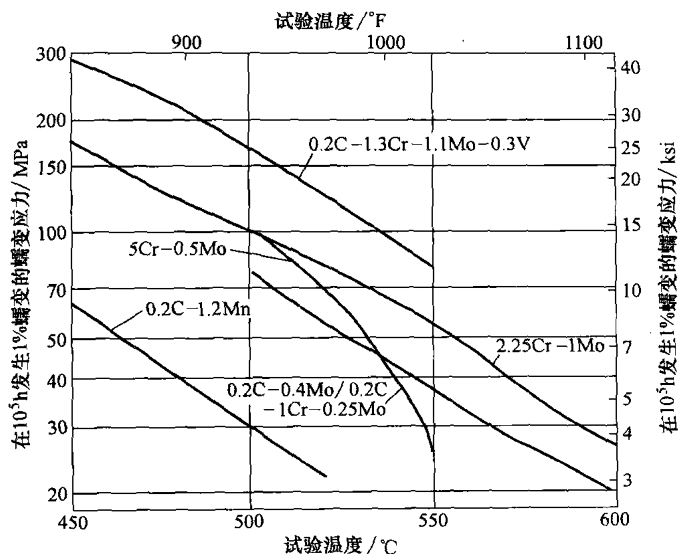


图2.3-62 不同的抗蠕变低合金钢的蠕变极限比较

数据，这些表明，这些钢对缺口一般不太敏感。图2.3-64所示是17-22AV钢(Fe-0.27C-0.75Mn-0.65Si-1.25Cr-0.50Mo-0.85V)具有代表性的带缺口和不带缺口的应力-断裂数据。

高温下的长期处置。由此会影响其短期或长期的性能。例如普通碳素钢处于高温(如650℃或1200℉)会造成过度回火或球化，不难预期显微组织的这种变化会改变钢的力学性能。其他冶金学方面的不稳定性也会影响钢的力学性能。例如长期处于上述温度的Cr-Mo钢，会促成碳化物组织的形成而造成碳化物的粗化、基体成分的变化以及蠕变极限的整体下降。

长期处于高温下也会通过环境影响各种不同钢的性能。碳素钢在空气中受到氧化，故钢制零件的横截面会因为表面氧化物的片状剥离而缩小。长期处于含碳或含硫的气氛里会造成碳或硫的聚集，可以期待经过如此处置后的钢会有不同的性能。

热冲击试验。该试验用于研究温度的快速变化对钢零件的影响。热冲击可以由一次性的温度变化而产生(如淬火裂纹)，或者因温度的反复变化所致像热处理夹具所经受的那样。

与时间相关的疲劳试验。试验在恒定的温度和恒定的载荷或应变条件下进行，并由此获得蠕变和松弛数据。然而，在很多实际用途里都会发生温度或作用应力(或应变)的反复变化。这些变化可以是随机的，也可以是有规律的、一致性的变化周期。为了确定在高温下叠加于恒定载荷上的周期性载荷的影响，可以使用多种疲劳试验：恒定的交变应力、恒定的交变应变、应力比大于零的拉伸-拉伸式加载，以及能在最大载荷上保持一定的时间的特殊波形。通过这些试验结果，能表明在所用试验条件中的哪些因素对于造成试件的变形和断裂来说是最重要的。有关蠕变与疲劳之间复杂的相互作用可以查阅《ASM特种材料手册》(《ASM Specialty Handbook》)，耐热材料(Heat-Resistant Material)中更为详细的论述。

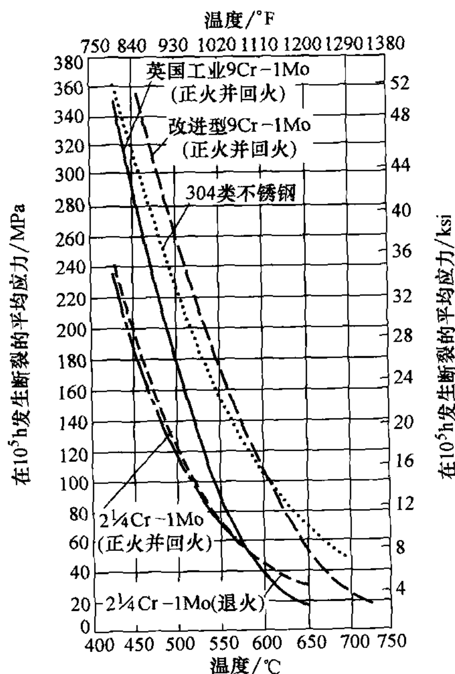


图2.3-63 2¼Cr-1Mo、标准9Cr-1Mo、改进型9Cr-1Mo和304类不锈钢的作为温度函数的不同100000h蠕变-断裂强度

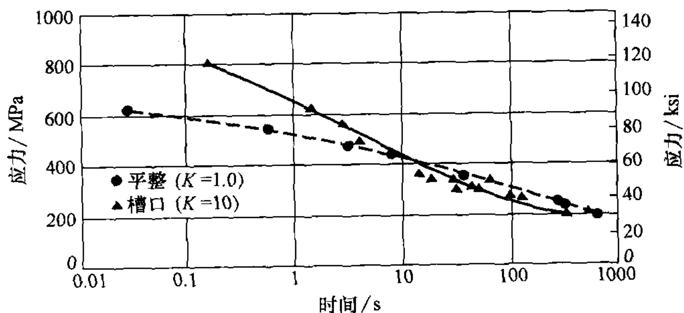


图2.3-64 缺口对应力断裂性状的影响。Fe-0.27C-0.75Mn-0.65Si-1.25Cr-0.50Mo-0.85V钢的平整(K = 1.0)和缺口试件经过595℃(1100℉)温度下试验的应力断裂性状。所有的试件都用980℃(1800℉)正火，并在675℃(1250℉)进行6h回火

数据的表达和分析

钢在高温下的特性受到很多变量的影响，其中的一些为时间、温度、应力和强度。试图分析这么多的变量是困难的，就连表达这些数据都有困难。现已研究出不同的方法对高温力学性能的数据进行相关、内插和外推处理。可以查阅的有关资料，如《ASM 手册》，第 8 卷力学试验和评价。

有一种比较不同强度钢的方法，就是把高温下的强度表达成其室温下强度的百分比；这种方法如图 2.3-65 所示。在图 2.3-65 中，所展示的强度的变化范围为 480 ~ 1100MPa(70 ~ 160ksi)。

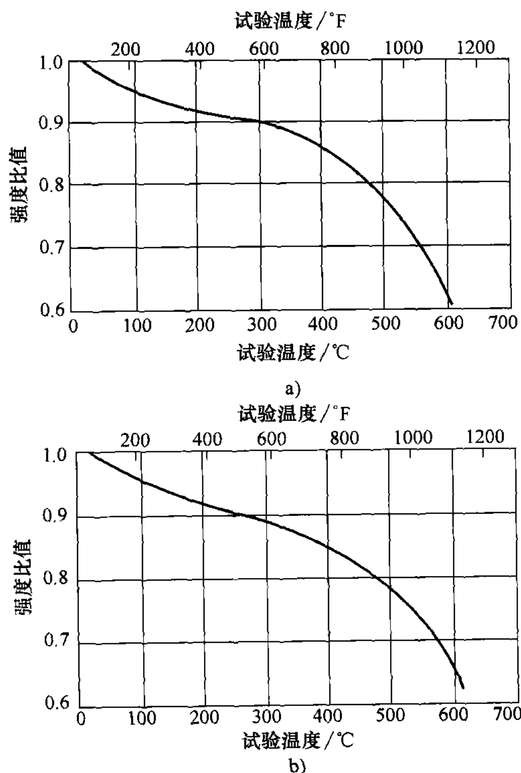


图 2.3-65 经淬火并回火的 2¼Cr-1Mo 钢，高温强度与室温强度的比值，回火到室温，其抗拉强度范围为 480 ~ 1100MPa(70 ~ 160ksi)

a) 抗拉强度 b) 屈服强度

图 2.3-66 示出了 2¼Cr-1Mo 钢的相同蠕变数据的四种不同表达方法。在图 2.3-66a、2.3-66b 和 2.3-66c 里只画了蠕变应变曲线。在同步应力-应变图，即图 2.3-66d 里使用的是总应变。在以总应变为主要依据的设计问题里，图 2.3-66d 所示的总体格式特别有用，其线性坐标刻度使不成比例的外推法使用起来更有些困难。

成分的影响

碳素钢和低合金钢的力学性能主要由化学成分和热处理决定。下面讨论合金元素在退火、正火并回火和淬火并回火中的影响。

碳。含碳量的增加能提高室温下的强度和淬硬性，但是会降低焊接性和冲击韧性。对于要用于高温用途的普通碳素钢和碳-钼钢，w(C) 通常控制在 0.20% 左右。然而，对于一些用于锅炉的管子，w(C) 可以高达 0.35%。对于含铬钢的 w(C) 通常限于 0.15%。碳能提高短期抗拉强度，但不能增加其温度在 540℃(1000℉) 以上的抗蠕变性，因为碳化物在这样的温度下终究要发生球化转变。

锰。其添加后的一般作用为通过形成弥散的硫化锰夹杂来防止发生热脆性，同时还能增强氮为提高普通碳素钢的高温强度所起的作用。锰能明显提高淬硬性，但是会引起回火脆化。

磷和硫。这是两种不希望有的元素，因为它们会降低钢的高温塑性。这种塑性的降低可以由应力断裂寿命和热疲劳寿命的缩短得到证实。磷还会引起回火脆化。

硅。它能提高钢的高温强度，还能提高低铬钢在空气里和高温下的抗氧化能力。

铬。少量的铬(w(Cr) 接近 0.5%) 是以碳化物和稳定剂的形式存在的。较大量(w(Cr) 到 9% 或以上) 的铬可以提高钢的耐腐蚀能力。铬还会影响淬硬性。

铬在抗蠕变的 Cr-Mo 钢中起的影响是复杂的。就其自身而言，铬能提高蠕变极限，尽管增加低碳牌号钢中的含铬量并不能提高其高温下的抗变形能力。在钼钢中加入铬一般会导致蠕变极限有些降低，如图 2.3-67 所示。图 2.3-67 的 1Mo 钢的最佳蠕变极限形成于 w(Cr) 约为 2.5% 时。当 w(Cr) 为 1%~2.5% 时，它具有强化钼钢(w(Mo) 为 0.5 ~ 1%) 的最佳效果。

钼。它也是一种要求具有 450℃(840℉) 以上的优良抗蠕变的耐热钢的基本合金元素，甚至少量的钼(w(Mo) 为 0.1 ~ 0.5%) 也会提高这种钢在高温下的抗变形能力。增加 w(Mo) 达到 1% 左右时，将大大提高其蠕变极限，但是会造成断裂塑性的大幅度降低。铬的加入可以改善其断裂塑性。

钼是一种碳化物的稳定剂，并能防止石墨化的发生。在一定的应力和温度范围里，碳化铁的溶解和碳化钼的同时析出，会造成这种钢的应变硬化。w(Mo) 为 0.5% 或以下也能将回火脆化降低到最低限度。

铌和钒。它们的加入可改善高强度性能。在一些含碳量较高的钢中，钒的加入可以获得更高的抗回火

图 2.3-66 蠕变数据的分析。540℃(1000℉)温度的 2¼Cr-1Mo 钢蠕变性状

a) 蠕变应变-时间曲线，常应力线画成平行 b) 应力-蠕变应变曲线

c) 应力-时间曲线，常应变线画成平行 d) 同步应力-应变曲线

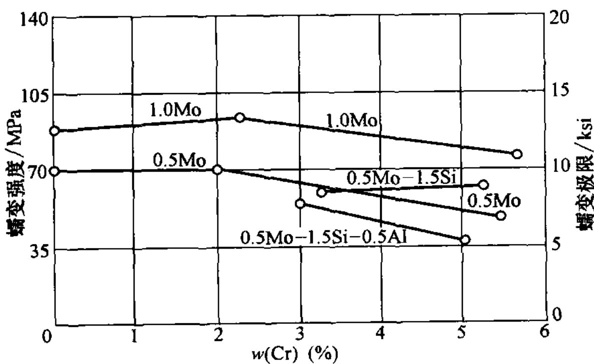


图 2.3-67 铬对含有少量的钼、硅和铝的几种钢在 540℃(1000℉)温度下的蠕变极限(能产生每小时 0.0001% 的最小蠕变率的应力)**的影响**

性并延缓碳化物在使用温度中的生长。在这种钢中，铌的加入有时是为了通过碳化物的形成来提高其强度。

钢的疲劳特性

疲劳就是当材料在一种其最大应力值小于(且常远小于)其静态屈服强度的名义应力的作用下，在材料内部因重复和波动的应变而引发的一种渐进的、局部的永久性结构变化。疲劳经过足够多次数的波动已累积成为裂纹并造成断裂。疲劳的过程分为三个阶段：

- 阶段Ⅰ：初始疲劳损坏导致裂纹的生成；
- 阶段Ⅱ：裂纹经扩展达到某种临界大小(其大小即零件中剩下的尚未开裂的横截面，已变得太脆弱而无法继续承受其冲击载荷)；
- 阶段Ⅲ：最终剩下的横截面的突发性断裂。

疲劳破坏是由循环应力、拉应力和塑性应变的同时作用而造成的。如果这三种中的任何一种不存在的

话，疲劳裂纹将不会产生并扩张。由循环应力引起的塑性应变会产生裂纹，拉应力促使裂纹生长(扩展)。对于应变的仔细检测表明，显微塑性应变能存在于很小的应力下，这在其他情形里则是一种完全弹性。虽然压应力不会造成疲劳，但是压缩载荷会造成局部拉应力。

疲劳特性

前面已经广泛地分析了不同的力学性能、成分、显微组织和宏观组织以及由它们对疲劳寿命造成的影响，由此将有助于选择合适的钢以满足特定的终端用途要求。研究表明，钢的疲劳强度通常与硬度和抗拉强度成正比；但是这个一般性原则也不尽然，高抗拉强度钢的韧性和临界裂纹尺寸都制约其最终承载能力。冶炼、制造、热处理、表面处理、精加工以及使用环境都会深刻地影响承受循环应力的金属最终特性。

预估金属零件的疲劳寿命是复杂的，因为材料对于加载条件和应力集中及其他因素的微小变化都很敏感。金属结构件的抗疲劳性还受制造工艺如冷成形、焊接、硬钎焊和镀层的影响，以及其表面状态如表面粗糙度及其残余应力的影响。用小试件做的疲劳试验不足以精确地确定零件的疲劳寿命。这种试验对于评定材料的相对耐疲劳性和确立承受循环载荷的材料的性能底线是有用的。在零件的寿命估算之前，必须将这个性能底线与零件的受载过程结合起来进行设计分析。

除了材料的性能和载荷以外，还必须考虑到加载的类型(同轴的、弯曲的或扭转的)、加载的形式(按固定或可变大小的周期性加载、或者随机性加载)、应力的峰值幅度、零件的总体尺寸、制造方法、表面粗糙度、微动或腐蚀性表面存在与否、运行温度和环境，以及工作过程中有可能发生的不正常现象。

以往疲劳寿命是用一疲劳裂纹从产生、经充分扩展直到发生突发性失效，即破碎成两部分所要求的应力循环总周数来表征的。本节所提的疲劳参数用总寿命表示。对于在实验室里用于确定疲劳性能的小样品一般都这样处理，但是对于真实零件，其裂纹的生成可以少至零件总寿命的百分之几或过其寿命的大半。

疲劳参数还可以用裂纹的生长率表示。过去一般都假设总疲劳寿命主要由裂纹的生成(即疲劳裂纹发展的第一阶段)构成，而细微疲劳裂纹的生长和发生失效所需要的时间只是总寿命中的微小部分。然而由于已经有了更好的裂纹探测方法，所以人们现在发现裂纹往往形成于材料疲劳寿命的早期(少至总寿命时间的10%以后)，然后不断生长直至突发性失效的发生。这一发现使得能够在某些用途里，利用裂纹扩展速率、临界裂纹尺寸和断裂力学来预估总寿命。本手册(下册)第5篇第1章里，将讨论断裂力学的应用。

疲劳失效的预防

通过对设计细节和制造工艺方面的倍加注意就能大大减少疲劳失效的发生。只要金属本身致密并没有大的裂隙，那么为了获得满意的疲劳寿命，材料成分上的一点变化则并不足为虑，远不如在设计、制造和使用过程中的维护方面所需要加以的关注的。为提高疲劳强度，最为有效和经济的方法是进行下面设计方面的改进：①通过将零件设计成流线化来消除应力。②防止因冲、锻、剪等造成的表面尖锐裂口。③在加工和热处理过程中，防止产生表面缺陷和脱碳。④减少或消除因制造、热处理和焊接造成的残余拉应力。⑤从细节方面改进制造和夹持方法。在有效的使用寿命期间，控制和防止腐蚀、侵蚀、化学反应或其他因使用引发的刻痕和擦伤都是正确维持疲劳强度的重要组成部分。

符号和定义

作用应力。应力中值 S_m 是一个循环作用中最大、最小应力的代数和平均值 $S_m=(S_{max}+S_{min})/2$。在完全反向的试验中，应力中值为零。应力范围 S_r 是一个循环作用中最大、最小应力的代数差值 $S_r=S_{max}-S_{min}$。应力幅度 S_a 为应力范围的一半 $S_a=S_r/2=(S_{max}-S_{min})/2$。

在疲劳试验过程中，应力循环通常保持不变，故作用应力可以用 $S_m \pm S_a$ 表示，这里 S_m 为静态应力或应力中值，而 S_a 为交变应力，等于应力幅度的一半。正号表示拉应力，负号表示压应力。S_m 和 S_a 可能的几种组合如图2.3-68所示。当 $S_m=0$(见图2.3-68a)时，最小拉应力等于最大压应力，这叫做交变应力或完全反向应力。当 $S_m=S_a$(见图2.3-68b)时，循环中的最小应力为零，这叫做脉动或重复拉(或压)应力。所有其他的组合就是所谓的波动应力，可以是波动拉应力(见图2.3-68c)、波动压应力，或者是一种在拉和压之间进行波动的应力(见图2.3-68d)。

名义应力。可以按照一个零件的净截面积计算($S=P/A$)名义应力，而不考虑因孔、槽、倒角等造成的应力条件变化。名义应力常用此方法计算，虽然使用应力集中系数的方法更不失为一种较接近真实应力的估算方法。

应力比。这是在一个应力循环中两个规定的应力

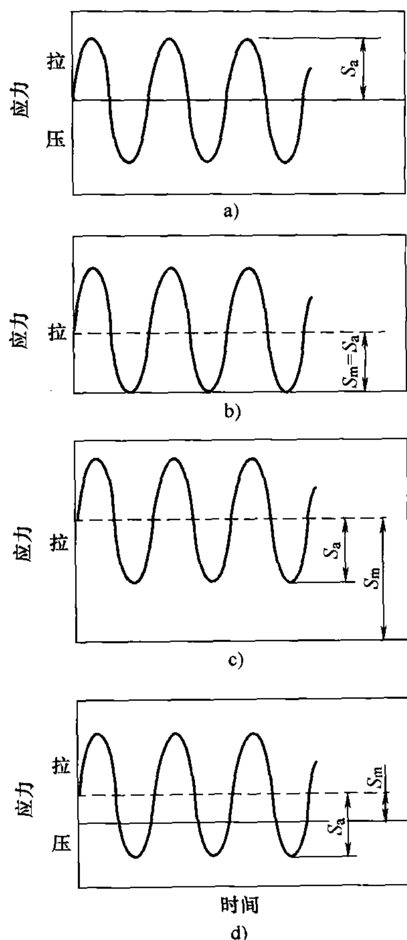


图 2.3-68　疲劳试验应力的种类

a）交变应力，$S_m=0$ 和 $R=-1$　b）脉动拉应力，$S_m=S_a$，最小应力为零和 $R=0$　c）波动抗拉强度，最大和最小应力均为拉应力，$R=1/3$　d）拉-压波动应力，最小应力为压应力，而最大应力为拉应力，$R=-1/3$

值代数比。有两种常用的应力比，比值 A，为交变应力幅度与应力中值之比（$A=S_a/S_m$）；比值 R，为最小应力与最大应力之比（$R=S_{min}/S_{max}$）。如果应力为全反向的，则应力比 R 变为 -1。如果应力只是部分反向，则 R 成为一个小于1的负数。如果应力循环在最大应力与无载荷之间，则应力比 R 为零。如果应力循环在两个拉应力之间，应力比 R 成为一个小于1的正数。应力比 R 为1，则表示应力无变化，而且试验将成为承载的蠕变试验而非疲劳试验。

***S-N* 曲线**。疲劳试验的结果通常都用最大应力或应力幅度对直到断裂的循环周数 N 的曲线表示，周数用对数坐标轴。应力则可以用对数也可以用线性坐标轴。由数据点画成的曲线称为 *S-N* 曲线。图2.3-69所示是一种材料以不同应力比试验所得结果的一组

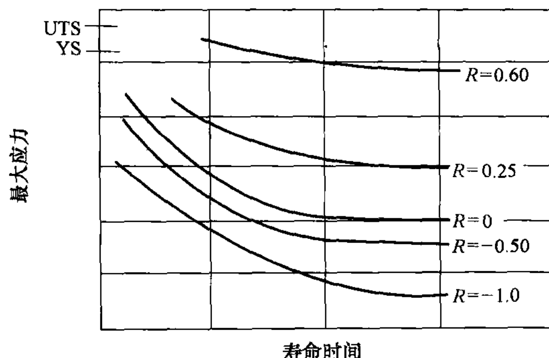


图 2.3-69　一种材料不同应力比的 *S-N* 曲线示意图。 UTS 和 YS 分别代表单轴拉伸试验中的最终抗拉强度和屈服强度

S-N 曲线。作为碳素钢和低合金钢，一般的 *S-N* 曲线都是从低周数的比较直的斜线部分经过急剧的转变过渡到高周数的水平直线。

一条 *S-N* 曲线通常都代表了一种给定应力的中值寿命——一半的试件能达到或超过，还有一半的试件未能达到的寿命。疲劳寿命的离散度会分布到一个非常大的范围。

疲劳极限（或耐用度极限）。当材料低于其称为疲劳极限的应力值时，就可以被认为能承受无穷多的循环周数，即 *S-N* 曲线上能一直保持水平线的应力。碳素钢和低合金钢的疲劳极限都是很典型的。

疲劳强度。这不要与疲劳极限相混淆，它是材料达到一规定循环周数所能承受的应力。疲劳强度用于诸如大部分的非铁金属材料，它们并不代表有明确定义的疲劳极限。它能用于表征碳素钢和低合金钢高于疲劳极限的疲劳特性。

应力集中系数 K_t。材料的应力集中可以从其缺陷，如缺口、空洞、划痕以及显微组织中的变化得到证实。应力集中系数 K_t 是缺口（或其他应力集中）处的最大应力与其相应的名义应力之比。为求得 K_t，缺口处的最大应力要用弹性理论计算得到，或者通过实验得到相当的数值。实验的应力集中系数就是缺口试件的应力与光滑（即无缺口）试件的应力之比。

疲劳缺口系数 K_f。这是在相同的试验周数条件下光滑（即无缺口）试件的疲劳强度与缺口试件的疲劳强度的之比。疲劳缺口系数将随 *S-N* 曲线上的位置和平均切应力而变化。由于塑性变形造成的缺口钝化，高应力和短周期的系数通常小于低应力和长周期系数。

疲劳缺口敏感度 q。这是对于大小一定并且具有一定形状和大小的应力集中的试件，通过比较其疲劳缺口系数 K_f 与应力集中系数 K_t 而求得的。疲劳缺口

系数的通用性定义为 $q=(K_f-1)/(K_t-1)$，此处 q 可以在 $0(K_f=1)$ 和 $1(K_f=K_t)$ 之间变化。该数值可以表示为百分比。由于疲劳缺口系数随S-N曲线上的位置而变化，故缺口敏感度也一样随之变化。大部分的金属在低应力和长周期都具有完全的缺口敏感性。如果不是这样，光滑(无缺口)试件则因为存在表面缺陷而导致其疲劳强度有可能低于其应有的疲劳强度。

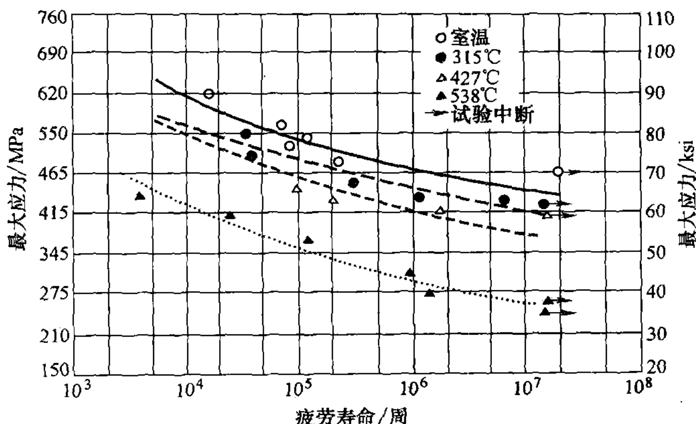


图2.3-71 最终抗拉强度为1090MPa(158ksi)且应力比 $R=-0.1$ 的AISI4340合金钢，在不同温度条件下的S-N曲线

疲劳的应力分析法

承受循环载荷的机器部件可以通过调整其零件外形，使计算得到的应力都能处于S-N曲线所要求的安全线上进行分析设计。在应力分析中，假定材料以名义上的弹性方式发生变形，而局部的塑性应变忽略不计。在上述有效近似程度里的应力分析方法是很有用的。这些假设说明所有的应力基本上都是弹性的。最好将这种应力分析法应用于看上去像试验样品、大小也大致相同的零部件上。这种方法所使用的许多技术都是针对钢的。其他材料也许得不到同样的效果。

从图2.3-70和2.3-71所示的应力疲劳寿命分析的

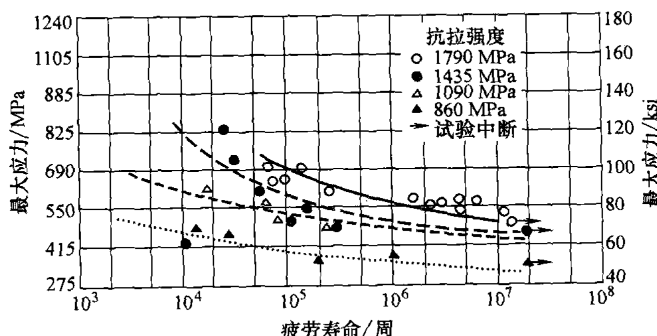


图2.3-70 不同最终抗拉强度且 $R=-0.1$ 的AISI4340合金钢，在室温条件下的S-N曲线

例子可以看到，其试件经热处理达到860～1790MPa(125～260ksi)的不同抗拉强度时，相同钢均能承受的一些循环应力组合。高温对于热处理到1035MPa(150ksi)的4340钢的疲劳特性影响如图2.3-71所示。温度的提高会降低钢的疲劳强度，而且对于应力比 R 介于0.4～1.0之间的一些用途是最为不利的。温度的降低可提高钢的疲劳极限，然而原先存在着裂纹的零件会因温度的降低而使总寿命缩短，因为同时伴随着临界裂纹尺寸的减小和断裂韧度的降低。

疲劳的应变分析法

已经证明，用于分析低周疲劳数据的疲劳应变分析法，对于长寿命的疲劳数据也是很有用的。这种分析法能包含由作用载荷所引起的弹性和塑性响应。这些数据用对数坐标画成像S-N那样的曲线，画在横坐标上的数值是到发生失效时应变的变换次数(循环次数的两倍)，纵坐标上的则是应变幅度(应变变化范围的一半)。

在循环加载过程中的应力-应变的关系，通常可以描绘成一个回路，如图2.3-72所示。对于纯弹性载荷，其回路就变成一条直线，它的斜率就是材料的弹性模量 E。滞后回路的发生是最为常见的。塑性应变范围 $\Delta\varepsilon_p$、总应变范围 $\Delta\varepsilon_t$ 和应力范围 $\Delta\sigma$ 的定义，均如图2.3-72所示。有着不同应变范围的一系列疲劳试验将产生一系列的

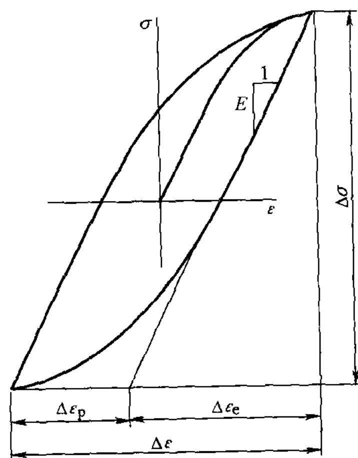


图2.3-72 应力-应变滞后回路[⊖]

⊖ 图2.3-72中 $\Delta\varepsilon$ 疑应为 $\Delta\varepsilon_t$。——译者注。

滞后回路。对于每一组的试验条件都存在着一个导致失效所必要的应变反向的特征性次数。

如图2.3-73所示，画在对数纵坐标的应变幅度中的塑性部分（塑性应变的一半）相对其疲劳寿命常常形成一条直线，用下面的方程式表示：

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}=\varepsilon_f(2N_f)^c$$

式中，ε_f为疲劳延展系数。c为疲劳延展指数，N_f为达到失效的循环周数。

冶金学变量对疲劳特性的影响

对碳素钢和低合金钢的疲劳特性影响最为显著的冶金学变量，是强度、塑性、钢的清洁度、表面状态和有害性环境。要想从它们对钢的强度的影响中区分出其他变量，如成分对疲劳的影响是很困难的，至少部分是由于疲劳试验数据的特征性离散。

强度。对于大多数硬度低于400HB的钢而言（不包括析出硬化钢），疲劳极限约是其极限抗拉强度的一半。于是可以期待，任何能提高一种钢的强度（或硬度）的热处理或合金元素的添加，都能提高其疲劳极限，如图2.3-70所示的一种低合金钢（AISI 4340）。然而如图2.3-74所示的中碳钢，再高的硬度（或强度）也无助于提高在低周数区（<10³周）的疲劳特性，因为此时塑性是更重要的因素。

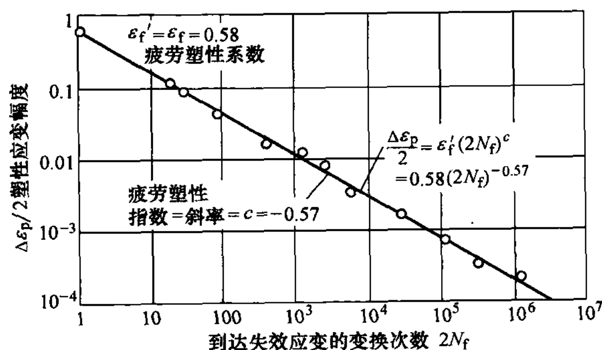


图2.3-73 经退火的AISI-SAE4340钢的塑性与疲劳寿命的关系

塑性。一般只有在低周疲劳的条件下，塑性对于疲劳寿命才是重要的。但是这种情况也有例外，包括大量的较少周次中所存在的偶尔过载的各种各样的加载形式，或有明显裂纹扩张的极脆材料。

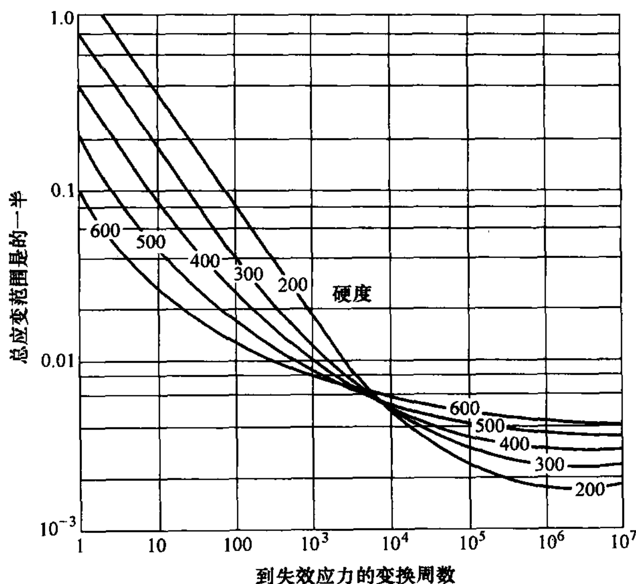


图2.3-74 硬度对总应变-疲劳寿命曲线的影响。这些可作为一般中碳钢在所示硬度上的寿命预估曲线

清洁度。一种钢的清洁度是指在钢里面相对不含有非金属夹杂物的程度。这些夹杂物一般都对钢的疲劳特性产生有害的影响（见图2.3-75），尤其在长寿命的用途里。非金属夹杂物的类型、数量、大小和分布对碳素钢和合金钢的影响远远超过因不同的成分、显微组织或应力梯度所造成的影响。然而非金属夹杂也很少成为生产零件发生疲劳失效的主要原因；如果试件含有在零件里所含的那些具有代表性的夹杂物，并利用这种试件的试验来决定设计的疲劳性质，那么这些夹杂物的任何影响都已经包含在试验结果里了。

大的非金属夹杂物常能用无损检测进行检查，然后再根据检测结果选择钢材。能够减少非金属夹

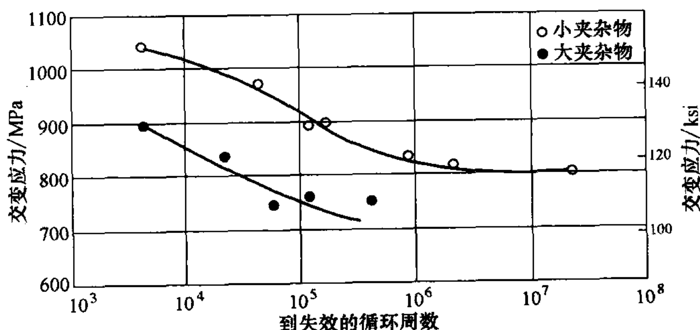


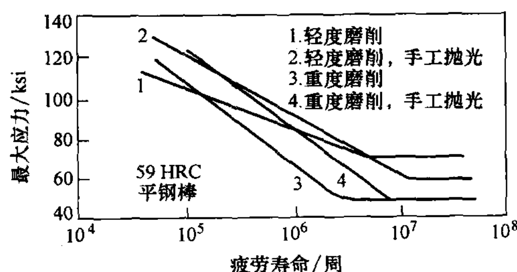
图2.3-75 非金属夹杂物大小对疲劳的影响。钢为两个批次生产的AISI-SAE 4340H钢：一个（下面的曲线）含有特别大的夹杂物，另一个（上面的曲线）含有小的夹杂物

杂的数量和大小的真空熔炼可以提高4340钢的疲劳极限，如表2.3-95所示。从表中看到，横向疲劳极限的提高尤为明显。

表2.3-95　炼钢工艺对SAE 4340钢的疲劳极限的影响

	电炉熔炼	真空熔炼
纵向疲劳极限/MPa(ksi)	800(116)	960(139)
横向疲劳极限/MPa(ksi)	545(79)	825(120)
横向与纵向之比	0.68	0.86
硬度　HRC	27	29
用反复弯曲疲劳试验($R=0$)进行测试		

表面状况。金属的表面状况能显著影响其耐疲劳性。表面的缺陷和粗糙度会降低零件的疲劳极限，对于高强度钢的这种影响最为明显。残余应力也起着关键的作用。例如在粗磨中产生的表面的残余拉应力会降低疲劳寿命，如图2.3-76所示。例如由喷丸硬化产生的表面残余压应力能够提高抗疲劳性(见图2.3-



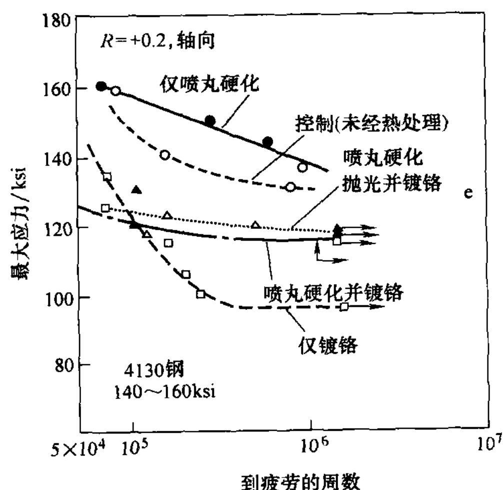


图2.3-76　表面粗糙度对光滑试件抗疲劳性的影响。表面粗糙度的影响包括一些在试验中规定的残余应力影响。一些表面热处理，如镀硬铬会产生裂纹，从而造成寿命的下降

76中的底下部分)。

脱碳就是碳从钢的零件表面失去，如图2.3-77所示，它会明显降低钢的疲劳极限。经过热处理，强度达到1860MPa(270ksi)的AISI-SAE 4340钢的缺口试件会因此降低疲劳极限，几乎跟缺口$K_t=3$的一样多。

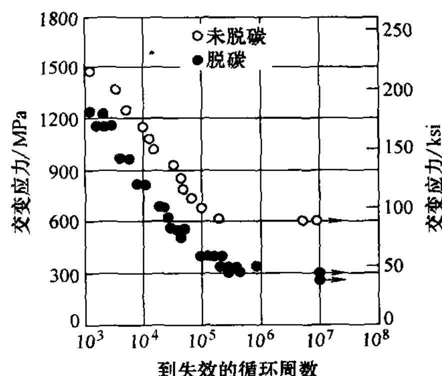


图2.3-77　脱碳对钢的疲劳性状的影响

当零件的表面经过跟其心部一样的热处理时，其表面脱碳层比较脆弱，因此耐疲劳的能力也比心部差。具有脱碳层的零件经过热处理还会引起残余应力，这也会降低材料的疲劳极限。已经有研究结果表明由脱碳造成的疲劳性能的损失，通过再次渗碳(使表面的碳恢复)或喷丸硬化至少可以部分地得到补偿。

钢的脆化

钢对许多脆化(丧失塑性)现象都是很敏感的。其中一些脆化会在很大的范围里影响化学成分，而另一些只会在特定的小范围里对成分有影响。这些问题会促使在应用中的脆性失效，它们可以是突发性的失效，或是缩短零部件的使用寿命。本节将阐述在热处理和高温应用中遇到的一些脆化问题。将要讨论的与碳素钢和合金钢有关的脆化形式如下所列：

- 应变-时效脆化(低碳钢)；
- 蓝脆性(碳素钢)；
- 淬火-时效脆化(低碳钢)；
- 回火脆化(合金钢)；
- 回火马氏体脆化(超高强度合金钢)；
- 石墨化(碳素钢和铬-钼合金钢)；
- 过热(碳素钢和合金钢)；
- 淬火开裂(中碳合金钢)。

更高的合金钢也对脆化现象有敏感性。影响不锈钢和马氏体时效钢的脆化类型包括：

- 敏感化(奥氏体和双相不锈钢)；

- 475℃(885℉)脆化(铁素体不锈钢)；
- σ-相脆化(奥氏体、铁素体和双相不锈钢)；
- 热脆化(马氏体时效钢)。

本节将只讨论马氏体时效钢的热脆化。本篇第7章将阐述与不锈钢有关的脆化机理。

此外，钢(和其他金属及合金)还会被环境因素脆化。环境脆化的形式包括：

- 中子脆化；
- 氢脆化；
- 应力-腐蚀脆化；
- 液体-金属和固体-金属脆化。

这些脆化形式将在本手册其他有关章节里阐述(参阅第5篇第1章)。

应变-时效脆化

应变-时效发生于经过一定程度的变形后再进行时效处理的低碳钢中，它会使强度和硬度增加而韧性降低。其变形或冷作硬化的程度是很重要的。一般来说，厚度上减小15%可获得最大的效果。最终的脆性将随时效的温度和时间而变。在室温下的时效是非常慢的，需要几个月的时间才能达到最大脆化。最大脆化需要的时间随时效温度的升高而减少，在200℃(400℉)下发生脆化也就是几分钟的事情。

应变-时效还会导致在冷轧低碳钢薄钢板零件上产生吕德斯带(滑移线痕)。这种压痕是装饰样的缺陷而不是裂纹，但是它们在成形零件上的出现是不允许的。在拉伸加载的过程中，对这种缺陷较为敏感的薄钢板会表现为不均匀的屈服，随后才是均匀的延展。在最大载荷下的伸长和总伸长会因此减少，即降低其冷成形性。在非铝镇静薄钢板钢中，少量的变形，一般为1%的压缩，也会阻延好几个月才到屈服点，这种工艺也就是所谓的轧辊矫平或回火轧制。这种工艺在消除急剧变化的屈服点和防止产生应变-时效方面，比采用拉延使钢通过吕德斯应变更为有效，后者要求压缩4%~6%。然而如果材料不是在安全期内进行成形，间断性的屈服最终则仍会产生并影响其成形性。

某些镀层处理，如热浸镀锌会在那些曾被冷作硬化到临界程度的部位产生高度的脆化，从而导致脆性断裂。为防止这种问题的发生，零件在电镀之前可以进行退火处理。

蓝脆性

碳素钢约在300℃(570℉)表现出强度的提高而塑性和韧性的降低。由于这种温度会在试件表面产生蓝色的回火颜色，所以这种问题被称为蓝脆性。一般认为蓝脆性是一种应变-时效脆化的加速形式。蓝热范围中经过变形后在室温下进行试验，这样所提高的强度将大于仅在环境温度里变形得到的强度。如果在钢里加入能与氮紧密结合的元素(如铝或钛)，就可以避免发生蓝脆性(研究表明,较高的含氮量会导致蓝脆性和应变-时效脆化)。

淬火-时效脆化

如低碳钢从稍低于钢的下临界温度(Ac_1)急速冷却，钢的硬度则得到了提高，但是同时由于室温下的时效而造成塑性的降低。像应变-时效一样，淬火-时效脆化取决于在时效温度里达到最大限度的脆化所需经历的时间。最大脆化所要求的一个时效期长达几个星期。

淬火温度的降低会降低脆化的程度。用560℃(1040℉)及以下的温度淬火不会产生淬火-时效脆化。w(C)为0.04%~0.12%的钢对淬火-时效脆化所表现的敏感性最大，增加w(C)到0.12%以上就能减少这种影响。淬火-时效脆化的造成是因为：①溶质碳在所处位错的地方析出；②由于在不同的温度下，碳在铁素体里有着不同的固溶度，故析出硬化就与此有关。

回火脆化

回火脆化(即所谓回火脆性、二次回火脆化或可逆回火脆化)是跟加热至临界温度范围内，或缓慢冷却通过该范围的各种回火合金钢有关的，对于低合金钢，其临界温度范围一般为300~600℃(570~1110℉)。这种处理会造成用夏比V形缺口冲击试件测试的韧性值下降。它对于厚截面的零件，如压力容器和涡轮机转子问题更为突出，它们在回火后缓慢冷却通过其脆化区，并且还要在临界温度的范围里使用。

回火脆化钢还表现为从塑性到脆性的转变温度(DBTT)的提高，以及在脆性试验温度范围里从解理到晶间型断裂模式的改变。DBTT可以用几种方法进行评价。最普通的是用50%塑性和50%脆性断口时的温度(即50%的断口外观的转变温度,即FATT)，或100%的塑性断口的最低温度(100%的纤维状准则)。在通常情况下，都不采用根据吸收能量值来确定的转变温度。回火脆化是可逆的，也就是说可以通过在超过临界区的温度进行回火，然后再快速冷却(如水淬)使脆性钢的韧性得以恢复，以此降低DBTT并使低温(即低于50%的FATT)下的晶间脆性断口外

观改变回解理的模式。

只有合金钢会发生回火脆化，而普通碳素钢不会发生，而且脆化的程度随合金成分而异。因此合金化元素的存在及其组合和含量的高低都是很重要的。其整体成分和杂质含量两者同样重要，尽管没有后者回火将不会发生。最有效的杂质元素为锑、磷、锡和砷（按有效性递减排序）。锰和硅也会促使脆化。以复合形式含有镍和铬的合金比单独含有镍或铬的合金对此更为敏感。当有杂质存在时，钼的加入能有效地延迟或消除回火脆化；但是为了保证其有效性，钼必须固溶于铁素体的基体中而不可固结为碳化物。

回火马氏体脆化

高强度合金钢的回火马氏体脆化（TME，即所谓的一次回火脆化和在350℃（500℉）中脆化）发生在温度范围为205～370℃（400～700℉）的回火中。它的材料强度及其处理的温度范围都不同于回火脆化。在回火脆化中，钢通常在相对较高的温度里回火，产生较低的强度和硬度，然后因回火后的缓慢冷却和在处于脆化温度范围的使用过程中发生脆化。在TME中，钢在脆化温度范围内进行回火，并且通常在室温条件下使用。这就是为什么回火脆化常常被称为二次回火脆化，而TME被称为一次回火脆化。

现已证实，下贝氏体组织也会在温度范围为205～370℃（400～700℉）的回火中脆化。其他组织如上贝氏体和珠光体/铁素体将不会在上述温度范围的回火中脆化。

当用DBTT的改变对回火脆化进行评估时，对TME的大部分研究都只是评估室温冲击吸收功的变化。一般当淬火合金钢在进行回火时，其室温下的韧性会随回火温度的升高[至约200℃（390℉）]而得到提高。若回火温度进一步升高，韧性将下降。然后随着回火温度再升高到约400℃（750℉）以上，韧性再次提高。这种韧性随回火温度升高所发生的变化，对于分析硬度或抗拉强度的数据并不明显，它们一般随回火温度的升高而降低。

TME的成因并没有像回火脆化的成因那样被清晰地确定过。350℃（500℉）的脆化相信是由于铁素体的网格化所致，因为这些网格化是渗碳体的薄层沿原先的奥氏体边界析出造成的。但是也有研究人员认为，像这样的晶界渗碳体薄层析出正是由于TME才产生的。

含有相当大量的铬或锰的钢对TME具有高度的敏感性。$w(\mathrm{Al})$高于0.04%会降低脆化，而$w(\mathrm{Al})$为0.1%通常能避免产生这个问题。当在高纯净钢里加入磷、锑、砷、锡、硅、锰或氮时，会发现有某种程度的脆化。氮的加入会产生晶间断裂，而其他脆化剂则不会（工业用牌号钢易发生TME处理的晶间断裂）。

在低合金钢通过热处理提高强度时，可以利用以下方法将脆化降低到最低限度：

- 开发延迟马氏体回火特性的特种钢；
- 开发较快速马氏体回火的钢；
- 利用100%转变为上贝氏体的能力，以达到所要求的强度和截面尺寸；
- 避免在敏感区回火；
- 用可能最低的含碳量达到所要求的强度。

石墨化

在火力发电厂和炼油厂里，在高于425℃（800℉）的温度下使用的碳素钢和碳-钼钢管材所发生的石墨化会造成多种失效。一般在金属被瞬时加热到高于下临界温度的窄小的焊缝热影响区里，会形成石墨。$w(\mathrm{Al})$超过0.025%会使碳素钢和碳-钼钢的石墨化趋势增强。用硅脱氧的钢也对石墨化产生敏感。而通常用钛脱氧的钢将产生抗石墨化的性能。碳-钼钢所表现的抗石墨化性能高于碳素钢。

脆化的程度取决于石墨的分布、大小和形状。石墨化的严重程度常采用弯曲试验进行评估。如能在早期进行对石墨化的探测，材料则常可以通过正火和仅低于下临界温度的回火得到补偿。遭受更为严重石墨化的钢是不能以这种方式进行补救的，缺陷区应当予以切割或补焊，或者必须更换其缺陷部分。通过仅低于下临界温度的回火，可以降低碳素钢和碳-钼钢对石墨化的敏感性。

过热

钢在进行热形变加工之前，如果加热到过高的温度则会发生钢的过热。甚至加热至比较高的温度会造成初始的晶界熔化，造成所谓过烧的问题。因此，发生过热的温度范围，为热形变加工以前正常使用的安全温度至开始发生液化的较高温度之间。发生过烧后再进行的热形变加工，由于其晶界处液体的存在一般会导致钢的撕裂和断裂。过热后的热形变加工一般不会发生开裂，如果进行充分的热轧，则过热的影响可以降低到最低限度或消除。如果热轧的程度很小，则其力学性能主要是韧性和塑性将受到影响。

只经过有限程度热轧的过热钢在其断口往往显示出粗晶粒化形貌。这些特征可以为其在淬火和回火以后还能否获得最佳韧性作为最清楚的辨别。

虽然过烧钢的力学性能非常差，但是过热钢的力

学性能表现出相当大的离散性。拉伸试验中，过热对塑性和断面收缩率造成的影响是最大的，并且随加热温度的提高使之降低。经过严重的过热，其断口的晶粒化和拉伸塑性的显著降低通常都能觉察得到。

冲击性能通常比拉伸塑性对过热更具敏感性。在分析冲击试验的结果时，应该关注以下几个相互有关的特征：上平台能量的变化、冲击强度的转变温度以及晶粒断口的出现。

淬火开裂

要在钢中形成完全马氏体组织，作为完整的热处理过程就必须包含奥氏体化后的淬火。钢的化学成分、淬火件的尺寸和要求达到的硬化层厚度决定了淬火的介质。已经知道有一些钢在淬火过程中或淬火稍后，对于开裂是较为敏感的。相对而言，对工具钢则是比较普通的问题，尤其是那些要求液体淬火的钢。

有许多因素能引起开裂敏感性：

- 含碳量；
- 淬硬性；
- *Ms* 温度(马氏体开始形成的温度)；
- 零件的设计；
- 表面质量；
- 炉子中的气氛；
- 热处理工艺。

含碳量增加，*Ms* 和 *Mf*(马氏体停止形成的温度)随之降低，而体积扩张和转变应力伴随着马氏体的形成而增加。一般来说，$w(C)$低于 0.35% 的钢不会有淬火开裂的问题。这种钢有较高的 *Ms* 和 *Mf* 温度，从而在淬火时能使一些应力得以释放。还有，转变应力也比较低，并且所形成的较低强度马氏体(低碳、板条形马氏体)比高含碳量钢更容易适应其变形。

标准临界直径为 4(原文如此，似为 4in 或 100mm——译者注)的合金钢对淬火开裂的敏感性大于较低淬硬性钢。淬火敏感性还随淬火的急剧程度的提高而增加。奥氏体化温度的控制也很重要，特别是对于高碳工具钢。过量的残留奥氏体和粗晶粒组织都将促使淬火开裂。淬火的均匀性十分重要的，特别在使用液体淬火介质时。当高碳钢淬火形成马氏体时，它们处于一种高应力状态，因此淬火后必须立即回火以消除这些应力，将开裂的风险降到最低限度。表面质量也是非常重要的，因为裂痕、折皱、划痕、压痕等都能起到应力集中的作用，从而使淬火开裂的敏感性得以定位和增强。

马氏体时效钢的热脆性

如果在热形变加工中有不适宜的处置，则低冲击吸收功也会使马氏体时效钢发生沿晶间断裂。当马氏体时效钢加热至 1095℃(2000℉)以上的温度里淬火，然后缓慢冷却通过或保持在 980 ~ 815℃(1800 ~ 1500℉)的温度范围时，所谓的热脆性的上述问题将由此产生。脆化是在缓慢冷却通过或保持在一个临界温度范围里的过程中，由于在奥氏体的晶粒边界上析出 TiC 和/或 Ti(C、N)而造成的。处于上述临界范围内的时间增加，脆化的程度也随之增加。增加碳和氮的含量会使马氏体时效钢对热脆性表现出较高的敏感性。俄歇分析表明脆化起始于钛、碳和氮在晶粒边界上的扩散，TiC 或 Ti(C、N)析出物的出现代表了脆化的早期阶段。

钢的缺口韧性

韧性是衡量钢吸收能量能力的一种标记，它取决于强度以及塑性。缺口韧性则是当存在着应力集中或缺口时，衡量钢吸收能量能力的一种标记。所有的碳素钢和低合金钢随着温度的降低都要经历一个从塑性到脆性的转变。根据化学成分、产品工艺和使用环境，这种转变的发生从室温以上的几百度到室温以下的几百度。有许多缺口冲击试验的开发是为了在相对评判的基础上对钢制产品的韧性进行筛选和评估，并确定特定钢制产品从塑性到脆性的转变。下面列举了不同的缺口韧性试验：

试　验	ASTM 标准
夏比 V 形缺口	E23
悬臂梁冲击	E23
下落重力尼尔塑性试验	E208
坠重破裂试验	E436
动态断裂试验	E604

夏比 V 形缺口试验是所有缺口试验里应用最广的。

图 2.3-78 所示是夏比试验机的示意图。一般的夏比试件如图 2.3-79 所示，其缺口方向是使其缺口根部与试件的表面相垂直。试件的方向(纵向或横向)依照适当的产品技术规范进行选择。试件要在试验温度中保温 10min，然后放在夏比型的冲击试验机上，在自由摆锤对其进行的一次性打击下发生断裂。对于夏比试件的断裂通常进行三种参数的检测。摆锤的能量消耗提供了试件断裂所吸收的能量，以 J(lbf · ft)为单位。断裂后，试件的断口形貌可以用于判断其塑性和脆性的断裂模式，还可以测量与缺口相对的断口基面上的横向伸长量。三种参数都能分别

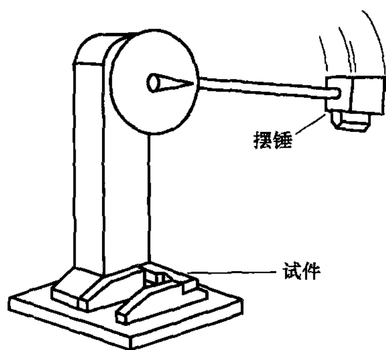


图2.3-78 典型的夏比试验机。将所示的试件冷却到要求的温度，然后迅速放置在试验的砧座上击断

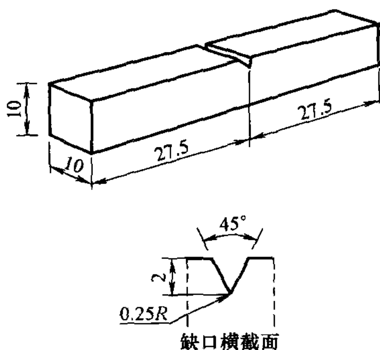


图2.3-79 夏比缺口试件用于评判缺口韧性(ASTM E23)，尺寸单位为mm

画出相对于温度的曲线，由此得到塑性-脆性的变化曲线。其中最普遍使用的测量为能量的吸收。对于钢制产品的技术指标，客户与供应商可以就特定的夏比V形缺口试验要求(如规定试验温度的最小吸收能量)达成协议。

塑性到脆性的转变

在体心立方金属如普通碳素钢和低合金钢里，在约为120～-130℃(250～-200℉)的温度范围里，冲击试验会出现一种独特的特性，也就是韧性从塑性到脆性的转变。在其范围的较高温度段里，其特性表现为伴有很大程度塑性变形的塑性断裂。最普通的这种塑性断裂模式是与一种微孔聚集(韧窝——译者注)相关的。在较低温度段里断裂是脆性的，其断裂模式是解理型的，很少或没有任何塑性变形。图2.3-80所示的夏比曲线就是钢的一种典型的塑性到脆性的转变。曲线表示的是吸收能量与试验温度间的关系。在高温段的稳定区称为上平台，在低温段的稳定区称为下平台。上、下平台之间显示的是一种称之为转变区的塑性和解理相混合的断口。

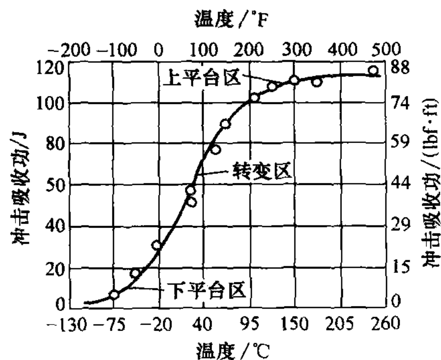


图2.3-80 Ni-Cr-Mo钢的夏比试验曲线，冲击吸收功与温度的关系

图2.3-81a所示是低合金钢在上平台区进行试验的断裂夏比试件的断口表面形貌。其吸收的能量为117J(8lbf·ft)。断口显示的是一种塑性的、带有许多剪切唇韧窝的形表面。如图所示的氮化钛(方形颗粒)和硫化锰(圆形颗粒)的夹杂物通常都位于每一个大韧窝的中心。这些夹杂物使孔穴开始形成，并由这些孔穴造就上述韧窝区。图2.3-81b显示了位于同一种钢的下平台区的典型解理断裂表面。吸收能量为6.1J(4.5lbf·ft)。在断裂照片上没有塑性撕裂区或剪切唇的存在。

由图2.3-80的夏比曲线可以求得转变温度。上面有一些转变温度的节点值，其中之一就是该温度范围中的中值温度。在图2.3-80里它为25℃(75℉)。其转变温度也可以说是吸收特定能量(此例中为20J或15lbf·ft)的温度。因此在图2.3-80中，20J(15lbf·ft)的转变温度应该为-30℃(-25℉)。

除了吸收能量以外，还能从夏比实验中得到其他一些重要的测量。例如，在断裂的夏比试件上，与缺口相对的棱边上测出横向延伸值。横向延伸可用于作为类似于吸收能量的缺口韧性的测量。另一种重要的测量就是断口形貌的转变温度(FATT)。为了测出这个数值，需要测量断口表面的剪切(纤维状断裂)百分比。50%的FATT代表50%剪切(50%纤维状的)时的温度。100%的FATT则代表100%剪切(100%纤维状的)时的温度。图2.3-82所示是与图2.3-80相同的钢的剪切百分比对试验温度所画的曲线。由图2.3-82可见，50%的FATT为25℃(75℉)。注意这个温度与从图2.3-80的曲线数据中求出的温度是一致的。对于有些钢，用能量确定的转变温度与FATT是不一样的。对于还有些钢，因为由条形夹杂物等所形成的木纹状断口表面，使得测量其剪切百分比很困

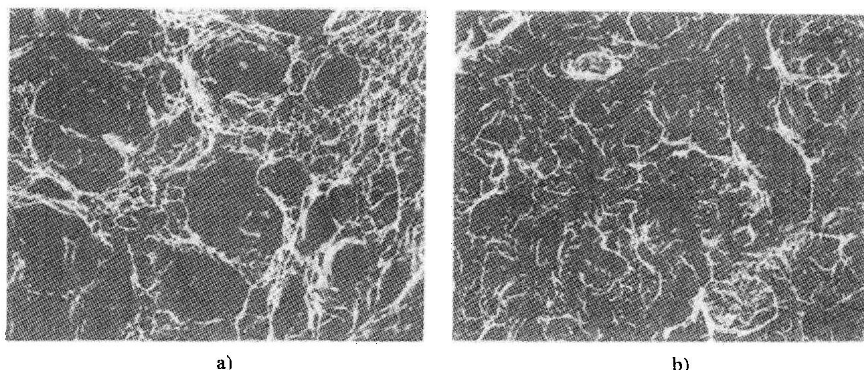


图2.3-81 SEM金相显微图显示的是夏比V形缺口试件(Ni-Cr-Mo钢)的断口表面，其试验条件为图2.3-80所示的夏比曲线里的上平台区和下平台区。两者：670×

a）上平台区 b）下平台区

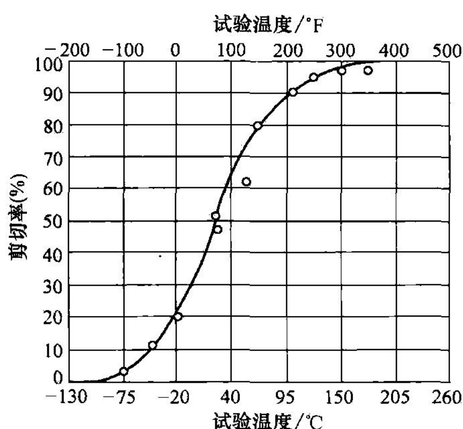


图2.3-82 与图2.3-80中相同的Ni-Cr-Mo钢的剪切率对试验温度的夏比曲线

难。在这些情况里，更适合通过测量横向延伸和吸收能量，求出精度更高的转变温度。

针对给定的用途选择一种最合适的转变温度测量方法是很困难的，它要求对韧性试验和使用特性两者都有深入的了解。常需要通过一些附加试验，在用某种方法测出的转变温度与用相同材料制成的特定结构的使用特性之间建立一种相关性。

成分的影响

钢的成分及其显微组织和工艺过程，都会在特定温度下断裂的过程中显著影响从塑性到脆性的转变温度范围和吸收能量。不同合金元素的影响和显微组织及工艺变量的影响有着密切的相互关系；实际上，改变其中一个变量而不影响其他变量都是很困难的。每一种单独的合金元素都会不同程度地对缺口韧性产生影响。

碳。增加含碳量主要是提高转变温度和降低上平台断裂能量，并最终提高强度和硬度。通过夏比V形缺口冲击试验测得的这些影响如图2.3-83所示。碳是所有能对缺口韧性和强度产生最有效影响的合金元素之一。因此为了在满足强度的前提下达到最大的韧性，钢的含碳量应该保持尽可能的低。低碳钢趋向于有非常陡峭的转变曲线。

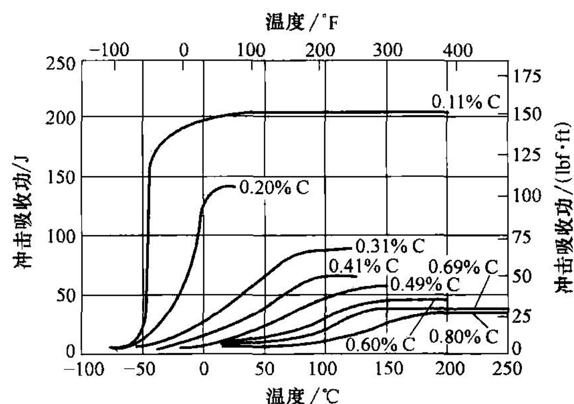


图2.3-83 不同含碳量的普通碳素钢的夏比V形缺口冲击吸收功随温度的变化

锰。它会对转变温度产生不同的影响。在低碳钢里它能有效地降低转变温度，如图2.3-84所示。在含碳较高的钢中，锰的好处不大。在调质钢锰中，会产生负面的影响，如图2.3-85所示。锰会使钢产生对回火脆性的敏感性，它在正火过程中减少具有韧性的上贝氏体(不是细珠光体)的形成。

硫。硫对钢缺口韧性的影响与脱氧工艺有直接关系。对于沸腾钢、半镇静钢和硅镇静钢，w(S)达到0.04%的硫对缺口韧性的影响可以忽略不计。然而作为硅-铝镇静钢，降低硫含量能有效地提高上平台

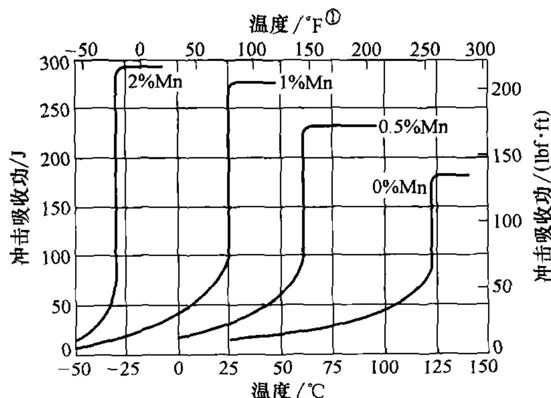


图2.3-84 不同含锰量的Fe-Mn-0.05C合金的夏比V形缺口冲击吸收功随温度的变化

①原书为℃，疑有误。——译者注。

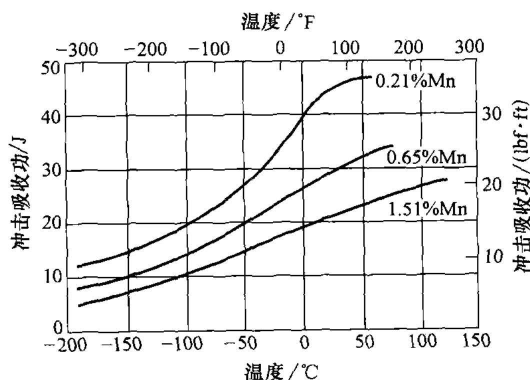


图2.3-85 含（质量分数）0.35%C、0.35%Si、0.80%Cr、3.00%Ni、0.30%Mo、0.10%V以及所示含量锰的合金钢的夏比V形缺口冲击吸收功随温度的变化。这些钢经硬化和回火，其屈服强度约为1175MPa（170ksi）。它们的显微组织中含有回火马氏体

能量。

磷。磷对钢缺口韧性有很强的负面影响。每0.01%P能提高50%的FATT约7℃（13℉），并且减少上平台能量。此外，磷还会增加某些钢对回火脆性的敏感性。

硅。使用w(Si)为0.15%～0.30%的硅对钢进行脱氧，一般能降低从塑性到脆性的断裂转变温度和提高上平台能量。与沸腾钢和半镇静钢比较，硅镇静钢是一种清洁剂，并能形成更细的铁素体晶粒。这种效应很可能是由所使用的脱氧方法在其冶炼工艺特征上的差异而不是硅含量所造成的。

氮。就其自身而言，氮可以降低上平台能量和提高转变温度，然而，大部分的氮化钢都是用硅和铝脱氧的，这两种元素都能与氮相结合。在脱氧过程中形成的氮化铝，以起到稳定晶粒大小的作用，从而改善这些钢的缺口韧性。

镍。镍对于改善低温下的缺口韧性是很有用的。高含镍量（w(Ni)为2.25%～9%）的铁素体钢适用于从0到-195℃（32到-320℉）的环境里。镍在中碳钢中改善韧性的效果不如在低碳钢中。一些高含镍量合金钢，如马氏体时效钢和奥氏体不锈钢并没有明显的塑性到脆性的转变（作为面心立方的奥氏体钢是不会有塑性到脆性的转变的）。高含镍量能降低上平台的断裂能量——但只是低到还是能为大部分用途所许可的程度。

铬。铬能稍微提高一些转变温度。要在w(Cr)超过0.90%的钢中形成普通碳素钢所具有的那种典型的显微组织和力学性能是非常困难的，因此冲击试验的结果是没有可比性的。通常铬的加入是为了提高淬硬性。而淬硬性的提高通常又能充分生成马氏体的显微组织，并由此提供高上平台能量。当中碳钢、纯铬的合金钢（如5140）淬火到马氏体然后在370和575℃（700和1070℉）之间的温度时，回火对于脆性是很敏感的。

钼。它在合金钢里的一般性含量（w(Mo)约为0.40%）能提高50%的FATT。钼常用于提高淬硬性，并主要通过其对显微组织的作用影响缺口韧性。合金钢里加入w(Mo)约0.5%～1.0%的钼能降低其对回火脆性的敏感性，但是它仅仅对脆化温度里的较短加热时间有效果。钼看来可以延缓而不是消除回火脆性，因为即使含有少量这种元素的钢，若长期处于脆化的温度范围里也是会变脆的。

硼。提高调质钢的韧性而又不降低其强度的实用方法，就是使用含硼且含碳量较低的牌号钢。然而硼的这种好处只能应用于调质钢，硼会降低轧制、退火和正火钢的韧性。

铜。在未曾接受析出硬化处理的钢中含有的铜看似对低温缺口韧性有一定的好处，然而铜会促使钢的析出硬化，结果又反过来影响缺口韧性，尤其当回火温度为400～565℃（750～1050℉）。

钒、铌和钛。它们是接受受控形变热处理的钢中最常用的元素。因此含有这些元素的钢的韧性在很大程度上都取决于所采用的轧制工艺。当钢在约为925℃（1700℉）以下的温度进行精加工时（这是某些HSLA钢的特性），钒、铌和钛主要通过细化铁素体的晶粒大小来提高韧性。在更高的温度下，这些元素对于韧性是不利的。

锆、钛、钙和稀土元素。它们可以用于控制硫化锰的夹杂物形状，使夹杂物成为球形的而不是长形的。球形夹杂物能提高上平台能量，并将缺口韧性的

各向不均匀性尽量减小，这些效果对于 HSLA 的薄钢板和薄的厚钢板特别有用。

制造工艺的影响

脱氧工艺。脱氧工艺对钢的缺口韧性的影响可以直接追溯到所存在的那些合金元素及所含杂质的脱氧工艺特征。沸腾钢一般都含有适量的氧和氮。沸腾钢的致密性和均质性常常都是很差的。沸腾钢的这些特性导致了缺口韧性的不足。镇静钢尤其是硅-铝镇静钢，比沸腾钢具有更低的转变温度和更高的上平台能量值。半镇静钢具有的韧性则在沸腾钢与镇静钢两者之间。这三种钢的韧性比较如图 2.3-86 所示。

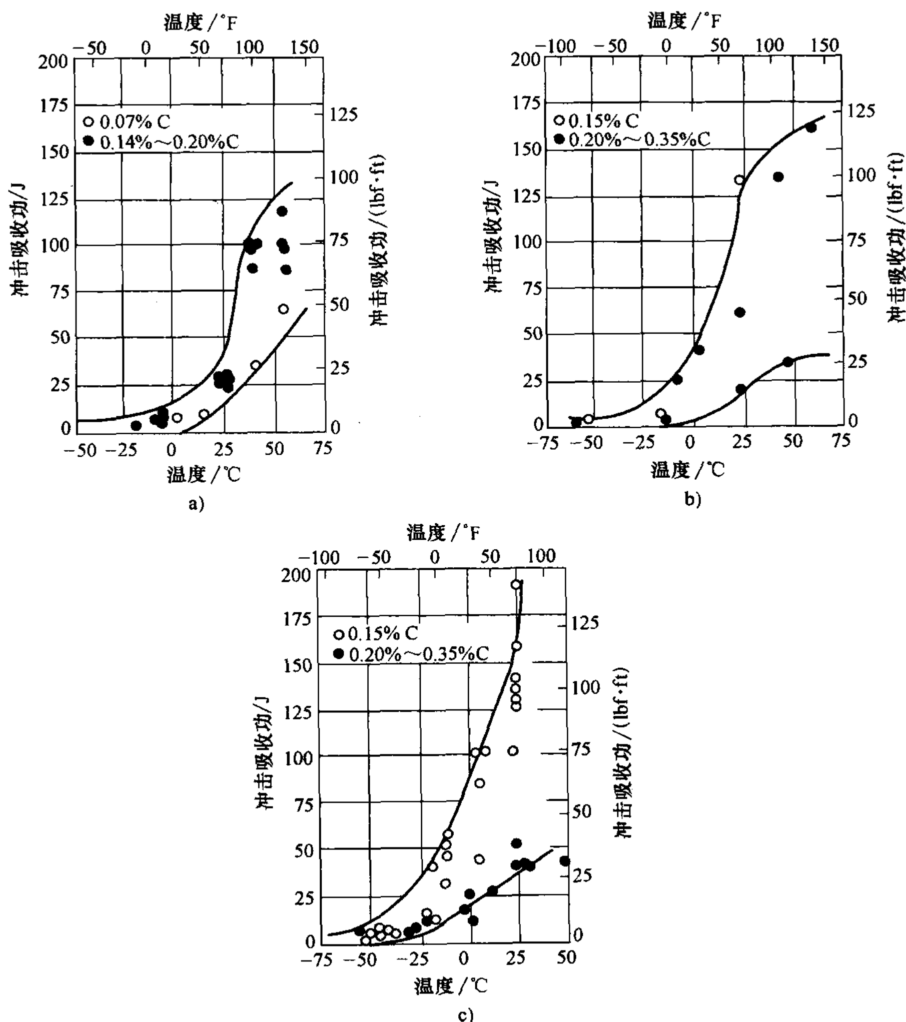


图 2.3-86　脱氧工艺对缺口韧性的影响。夏比冲击吸收功随温度的变化

a）沸腾钢　b）半镇静钢　c）普通碳素镇静钢

热形变温度。热形变对钢的缺口韧性的影响与热轧和锻造过程中形成的显微组织有直接的关系。在轧制过程中，在大约 980℃（1800℉）以上的温度中形变的钢要经受相当程度的重结晶及晶粒生长，由此形成的组织只受到轧制工艺的轻微影响。在如此高温中形变的钢的缺口韧性在很大程度上取决于重结晶后的奥氏体晶粒生长大小。晶粒大小对转变温度的影响如图 2.3-87 所示。当钢在低温下形变时，其重结晶和奥氏体晶粒的生长达不到在较高温度下形变所能达到的程度。于是，可以通过在奥氏体温度范围的较低部分里的形变而明显降低其转变温度。图 2.3-88 所示是在热轧过程中，其最终形变加工温度对碳-锰钢的吸收能量为 54J（40lbf · ft）的夏比 V 形缺口转变温度的影响。

韧性的各向不均匀性。钢经过变性加工会形成很强的各向异性显微组织。各向异性的显微组织常会显

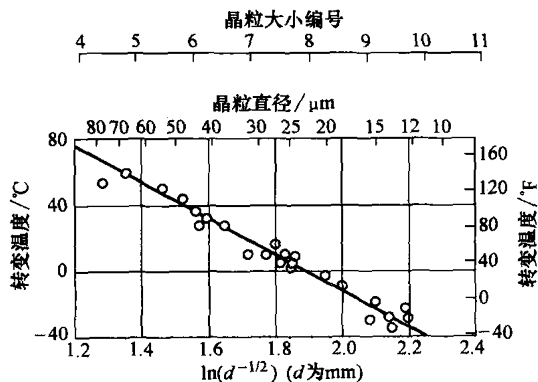


图2.3-87 晶粒大小对转变温度的影响。w(C)为0.11%的低碳钢的断口形貌转变温度随铁素体晶粒大小而变化。其转变温度随ln($d^{-1/2}$)成线性变化并低于细晶粒钢

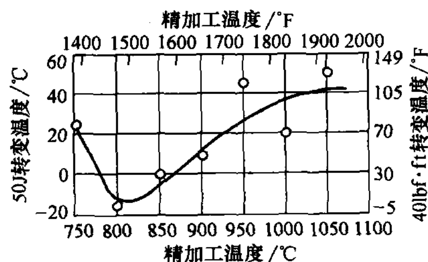


图2.3-88 精加工温度对缺口韧度的影响。硅镇静0.24C-1.69Mn钢的54J(40lbf·ft)夏比V形缺口转变温度，随热轧精加工温度而变化

示出力学性能的各向异性，尤其是其缺口韧性。所以，各向异性是钢制产品的设计和轧制、锻造、拉拔乃至挤压制造的重要考虑因素。

各向异性对轧制的低合金钢的缺口韧性的影响如图2.3-89所示。平行于轧制方向(L-S和L-T方向)的试件能在整个塑性到脆性的转变温度范围里表现出比垂直于轧制方向(T-L方向)的试件更高的冲击吸收功。根据ASTM E23，方向L-T是标准的纵向试件，而方向T-L是标准的横向试件。因此，当将厚钢板切割成零件时，重要的是要规定相对于轧制方向的零件方向。

在厚钢板制造过程中的轧制方法会影响其各向异性。例如，如果钢进行交叉轧制，使其两个方向得到几乎相同的热压缩量，则表示其曲线的方向就在用传统方法轧制的材料的L-T和T-L曲线之间的位置上相叠合。

不论交叉轧制的量如何，沿平行于厚钢板表面刻槽(L-S方向)的试件所吸收的能量大于与厚钢板表面呈直角刻槽(L-T方向)的试件所吸收的能量。在图

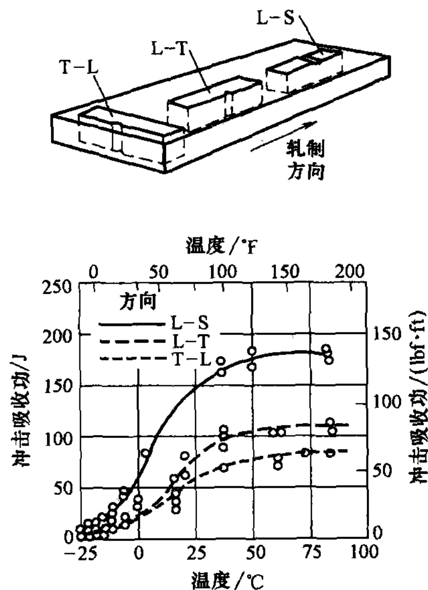


图2.3-89 含w(C)为0.012%的碳钢板的夏比V形缺口冲击吸收功随槽口方向和温度的变化

2.3-89所示的试验中，发生转变的温度范围(还有剪切断裂的转变温度)同样与刻槽或试件的方向无关。在其他一些试验里，能量吸收和断口形貌两者的转变温度都是横向的比纵向的高。

截面和零件大小。断口特性的变化还会因某种材料厚、薄轧件在金相组织上的差异造成。例如，热轧低碳钢的转变温度随厚钢板的厚度而变化，如图2.3-90所示。在这些试验中，尽管试件的大小不变，从塑性到脆性的转变能量还是要随厚钢板厚度的增加而增加。韧性随厚钢板厚度的增加而降低，并不仅限于低碳钢，还适用于所有的钢。鉴于工业上常用工艺特征上的原因，厚轧件的金相组织跟薄轧件的是不相同的，从而导致厚轧件所固有的韧性较低。更重要的

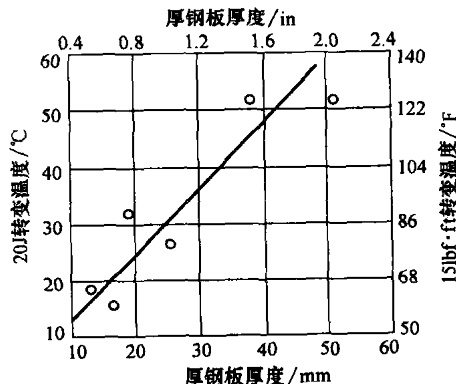


图2.3-90 铝半镇静钢(0.14C-1.25Mn-0.0075S-0.020PP-0.021Nb)的厚钢板厚度对缺口韧性的影响

是，作为一个零件的轧件厚度或零件尺寸越大，它包含有致命性大小(或更大)的裂纹或缺陷的可能性也将越大。厚轧件所固有的低韧性及其大裂纹、大缺陷的高发性是与厚机件里所固有的平面应变状态分不开的，这也说明大型结构件对脆性断裂的敏感性要超过小型构件。

显微组织的影响

就像大部分的力学性能一样，钢的缺口韧性可以直接追溯到显微组织。因为钢的显微组织是很容易观察和归类的，这也就不难将不同的力学性能归咎于显微组织，尽管这些性能还可能同时与钢的成分和制造经历有关。

显微组织的组成。一般来说，在钢中所见到的主要显微组织组成中，珠光体和铁素体有着最高的转变温度，上贝氏体次之，最后为回火马氏体和下贝氏体。具有不同的含碳量和显微组织相类似的钢，其缺口韧性值如图 2.3-91 所示。为便于对不同的显微组织进行比较，这些钢在试验前都回火到一致的强度。事实上冷却和淬火速度决定了特定钢的最终显微组织及其组合。其特征的转变受制于冷却速度、合金含量、奥氏体化的温度及奥氏体晶粒的大小。

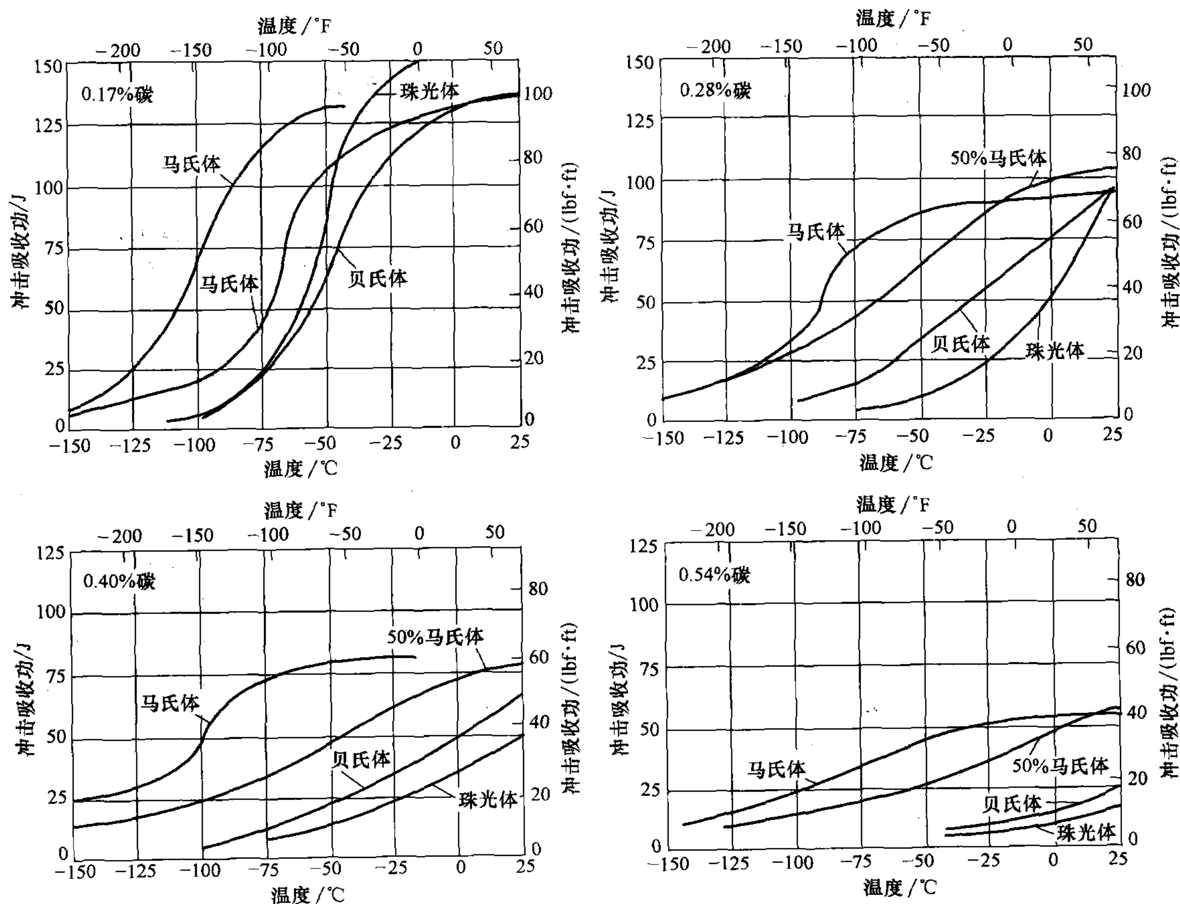


图 2.3-91　显微组织对缺口韧性的影响。0.70%Cr、0.32%Mo(质量分数)钢的夏比 V 形缺口冲击吸收功随显微组织和含碳量而变化。珠光体组织是在650℃(1200℉)的温度下转变而生成的。w(C)为 0.17%~0.54% 的钢经过在 450℃(850℉)的铅里分别经过 10s、19s、35s 和 100s 的淬火形成含有 50% 马氏体的组织。w(C)为 0.17% 和 0.28% 的钢用水淬和 w(C)为 0.40% 和 0.54% 的钢用油淬都可形成全马氏体组织。贝氏体的形成是用 450℃(850℉)的铅淬并保温 1h，其中 w(C)为 0.54% 的钢需要保温 3h。上述所有的试件都要经回火达到同样的硬度

一般能形成在室温下韧性低下的显微组织的处理还会使转变温度升高。析出物和第二相颗粒对于韧性是有害的，更甚者是当其处于晶体的边界时。珠光体钢的球化处理能通过降低强度和消除铁素体薄片(板片状，故易于崩裂)而提高其韧性。球化还可以将珠光体的脆性渗碳体薄片的形状改变为良性的球状颗

粒，以此提高其韧性。此外，钢会因为各种脆化过程，如回火脆化而丧失其韧性。

具有回火马氏体或下贝氏体组织的钢能形成一种强度与韧性的最佳平衡。用光学显微镜观察这两种显微组分是难以区分的。只有用透射电子显微镜才能将回火马氏体从下贝氏体中区分出来。这两种显微组分里是哪一种能更好地起到缺口韧性的作用，到现在还有争议。

经等温转变的下贝氏体具有超韧性，其转变温度也比形成同样强度的回火马氏体的要稍低一些（见图2.3-92）。然而，由于不完全的贝氏体处理而导致马氏体的部分转变，并由此造成混合组织比起无论是回火马氏体还是100%的下贝氏体，都具有较低的韧性和高得多的转变温度。因此，使贝氏体处理全部完成以避免混合组织的负面影响是很重要的。

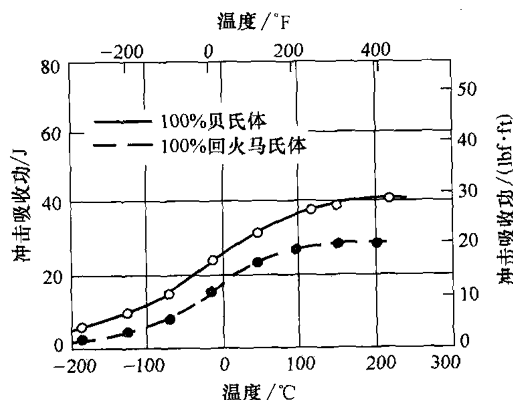


图2.3-92 具有100%回火马氏体和100%贝氏体显微组织的4340钢试件的夏比V形缺口冲击吸收功随温度而变化。所有的试件都在中性的盐浴中以845℃（1550℉）的温度奥氏体化30min。100%的贝氏体是在搅拌的盐浴中以315℃（600℉）的温度经过1h的等温转变而生成的。100%的回火马氏体是在搅拌的温度为50~55℃（120至135℉）的油池里淬火，再以315℃（600℉）回火而生成的。所有的试件均有相同的抗拉强度

最后，在某些铁素体和马氏体钢中，奥氏体的存在能阻止解理的快速扩张。

钢的断裂韧度

断裂力学技术能有效地提高设计安全性和可靠性构件的能力。应用断裂力学理论能将对结构整合的基本参数进行统一和量化。这些参数包括作用应力的大小幅度和范围、已有裂纹的扩张速度以及材料的断裂韧性。

线性-弹性断裂力学技术是一种以分析方法为基础的技术，而这种分析方法旨在将裂纹尖端附近的应力场大小和分布与作用于构件的名义应力，裂纹或裂纹状的缺陷的大小、形状和方向，以及材料的性能进行关联。应力场方程式表明弹性应力场的大小可以用单一的参数K表征，该参数定义为“应力强度系数”，下面予以简要的描述。

基本原理

断裂力学原理就是为含有裂纹的构件或零件预测承载能力的一种基本方法。断裂力学的方法是以一种对围绕承载体中任何裂纹的特征应力场的数学表述为依据的。当与裂纹的大小相比，围绕裂纹的塑性变形区为很小（对大型构件或高强度材料常常是这样的）时，围绕裂纹的应力场的大小幅度通常用应力强度系数K表示如下：

$$K=\sigma\sqrt{(\alpha)}Y(\alpha/W) \tag{2.3-1}$$

式中，σ为外加作用应力；α为特征性的缺陷大小尺度；Y为几何系数取决于裂纹的长度α和宽度W之比，通过线性弹性应力分析求得。

所以，应力强度系数K所代表的单一参数反映了作用于样品的应力和样品里一定大小的裂纹的两种影响。例如，在模式Ⅰ的加载中（即拉伸加载垂直于裂纹平面，如图2.3-93所示），在任何物体里的裂纹尖端处的应力强度系数K_{I}有以下关系：

$$K_{\text{I}}=\sigma\sqrt{\pi\alpha f(g)} \tag{2.3-2}$$

式中，α为裂纹长度；$f(g)$为代表裂纹几何和结构形状的函数。这种一般关系有可能将实验室的结果演绎成实际设计数据，而无需扩展其使用经验和相关性。

对于给定作用应力的应力强度值随裂纹长度的增加而增加，而对于给定的裂纹长度的应力强度值则随

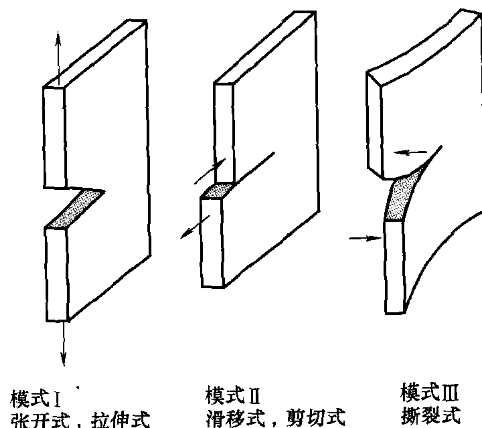


图2.3-93 加载模式

作用应力的增加而增加。作为断裂力学的基本原理之一，当在裂纹尖端处的应力强度系数达到一个临界值K_c时，就会发生不稳定的断裂。对于模式I变形和小裂纹尖端塑性变形(平面应变状态)，作为断裂不稳定性的临界应力强度系数K_{Ic}代表了材料抵制渐进性拉伸裂纹向前延伸的固有能力。然而，这个断裂韧度的性质随其约束条件而变化，像其他的材料性质(如屈服强度)一样，它随温度和载荷比的变化如下：

- K_c是静态加载和可变约束条件的平面应力状态的临界应力强度系数。于是，其数值取决于试件的厚度和几何形状，以及裂纹的大小。
- K_{Ic}是静态加载和最大约束条件的平面应变状态的临界应力强度系数。于是，其数值适用于厚钢板的最小值。
- K_{Id}是一个适用于动态(冲击)加载和最大约束的平面应变状态的临界应力强度系数。

此外，K_c、K_{Ic}或$K_{Id}=C\sigma\sqrt{\alpha}$，此处，$C$为常数，是试件和裂纹几何形状的函数；$\sigma$为名义应力(ksi)；$\alpha$为缺陷大小(in)。

K_c、K_{Ic}和K_{Id}的每一个值也都是温度的函数，特别对于展示其特性从脆性到塑性转变的那些结构材料而言。

通过已知某种具有特定厚度的材料在失效(K_c、K_{Ic}或K_{Id})时的临界值K_I，设计人员就能够在一定的温度和加载速率的条件下，确定结构件中为设计应力大小所允许的缺陷大小。反之，还能根据在结构件里可能已有的裂纹而确定所能承受的设计安全应力。

有关应力强度系数与不同的体形，裂纹的大小、形状和方向，以及加载条件之间的关系的内容可参阅参考文献[1]~[5]以及本手册(下册)第5篇第1章和第4章的相关内容。

断裂韧度性能

因为在强度、成分和显微组织方面具有相当大变化范围的一大批各种钢试件，都已经过断裂力学性能的测试，以下将介绍几类钢的典型数据：

- 铁素体-珠光体钢(普通碳素钢、碳-锰钢和HSLA钢)，它们名义屈服强度的范围约为240~470MPa(35~70ksi)。
- 淬火和回火合金钢(低、中碳含量)，其屈服强度的范围约为600~900MPa(90~130ksi)。
- 超高强度钢，根据热处理，其屈服强度可接近或超过大约1400MPa(200ksi)。这类钢包括中碳调质钢、高断裂韧度的Fe-Ni-Co钢以及18% Ni马氏体时效钢。

有关这些钢的包括成分、应用规范和最低力学性能要求的其他数据，可以参阅本章里的其他各节。

断裂韧度与屈服强度。上述三种钢的断裂韧度与屈服强度之间的关系如图2.3-94所示。图示表明，较高强度钢的断裂韧度一般随屈服强度的降低而增加，并且在高断裂韧性钢的显微组织中有塑性(低碳的)马氏体和残留的亚稳态奥氏体作为主要相而存在。含有以铁素体和珠光体组织为主的钢的断裂韧度则相对较低。表2.3-96概括了显微组织对韧性的影响。

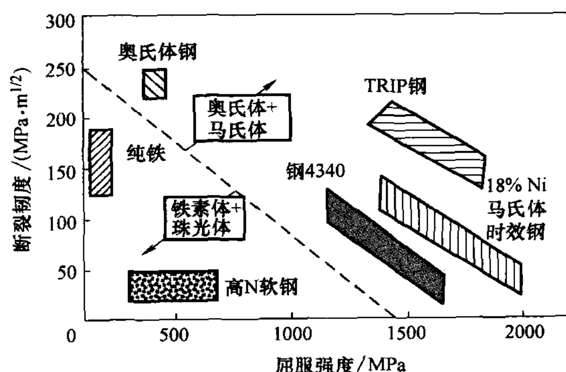


图2.3-94 对于结构钢作为屈服强度函数的断裂韧度。K_Q，假定性的K_{Ic}值。TRIP，转变诱生的塑性。引自参考文献[6]

表2.3-96 显微组织变量对钢断裂韧度的影响

显微组织参数	对韧性的影响
晶粒大小	奥氏体和铁素体钢中的K_{Ic}随晶粒大小减小而增大
非合金的残留奥氏体	裂纹的减弱使K_{Ic}决定性的增大
合金残留奥氏体	因转变引起的韧化使K_{Ic}有效增大
板条间和板条内的碳化物	增加解理的趋势而使K_{Ic}减小
杂质(P、S、As、Sn)	回火脆化使K_{Ic}减小
硫化物夹杂物和粗碳化物	裂纹的增生或微孔聚集使K_{Ic}减小
高含碳量(w(C)>0.25%)	解理易于聚集而使K_{Ic}减小
孪晶马氏体	因脆性而使K_{Ic}减小
淬火钢中的马氏体含量	使K_{Ic}增大
淬火钢中的铁素体和珠光体	使马氏体钢的K_{Ic}减小

引自参考文献[6]。

合金化学的影响。通过对淬火、回火钢(4340)与马氏体时效钢的韧性值的比较，可以充分了解添加合金元素对断裂韧度的影响。这里所指的合金化学的主要差别在于含碳量，马氏体时效钢的含碳量(w(C)

为0.03%）是很低的，但是淬火、回火钢的含碳量（w(C)为0.25%以上）就比较高，马氏体时效钢的w(Ni)为18%，还有一些钛是作为强化剂加入的。作为一般性规则，可以推测在超高强度的钢里，碳及强碳化物的形成元素有降低韧性的趋势。

由于合金化学会影响其他特性如淬硬性、回火效应、强度和塑性（参考文献[7]），要想从其他变量中区分出由化学作用对断裂韧度所引起的影响是非常困难的。在一系列使强度保持常量的试验里（参考文献[8]、[9]），w(Ni)增加大约5%，在一定转变温度范围里的韧性就会提高约50%，如图2.3-95a所示。这里，室温里的屈服强度为1175MPa(170ksi)。另一方面，在-100℃(-150℉)下，在屈服强度为500～700MPa(73～102ksi)的低强度钢里加入w(Ni)为3.5%的镍能提高断裂韧度100%以上（参考文献[10]），这可以由图2.3-95b说明。应当指出的是，添加中等含量的镍主要可以通过其阻止解理而提高低温下的断裂韧度，但是在高温下就几乎不见效了，因为这时微孔聚集是其断裂模式。这就是图2.3-95a所示的在高平台区的情形。

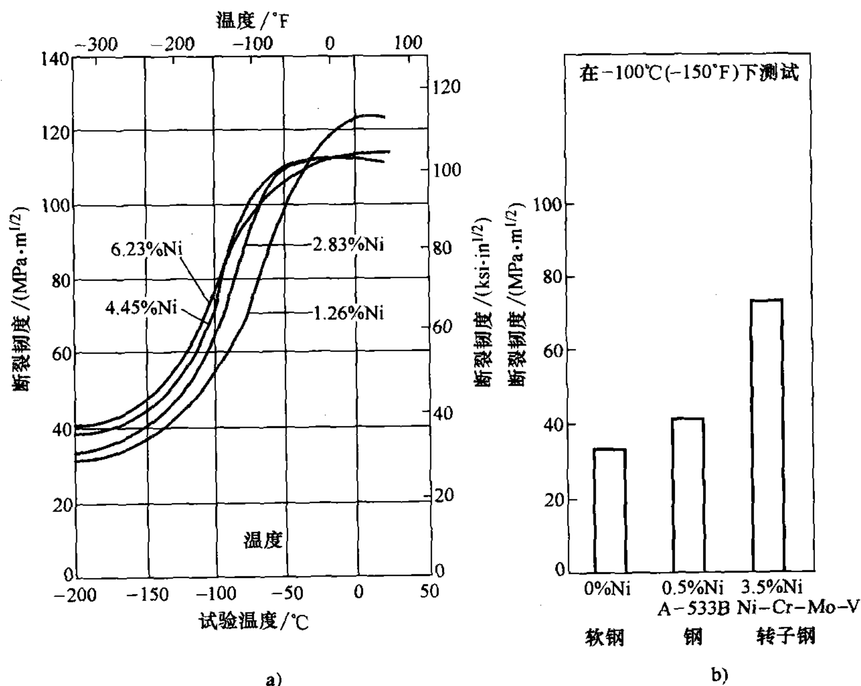


图2.3-95　几种钢的镍含量对其断裂韧度的影响

a）含（质量分数）0.35%C、0.65%Mn、0.35%Si、0.80%Cr、0.30%Mo、0.10%V及不同的含镍量的高强度钢，所有的钢都硬化到1175MPa(170ksi)的屈服强度。引自参考文献[8]、[9]　b）屈服强度为500～700MPa(73～102ksi)的低强度钢（w(Ni)为0～0.5%），温度为-100℃(-150℉)

众所周知，含碳量的减少会降低铁素体-珠光体钢中的转变温度。如果要通过回火使强度保持不变，则对于超高强度钢这种情况是并不多见的。w(C)分别为0.28%、0.35%和0.41%，并强度保持在1175MPa(170ksi)的合金钢的含碳量，对断裂韧度曲线的影响如图2.3-96所示。在转变温度的范围里几乎没有影响，但是在上平台区里有相当大的影响，这时微孔聚集（塑性断裂）是其断裂模式。

夹杂物含量的影响。非金属夹杂物（单一的或成团的夹杂物）会降低断裂韧度，尤其对于高强度钢。图2.3-97所示是硫化物夹杂物含量（是硫含量的函数）对4345钢的断裂韧度的影响。因为这种影响，当选择合金钢用于特定的关键性用途（如飞机的着落架）时，常要为其规定专用的熔化和冶炼工艺要求。真空电弧炉重熔（VAR）、真空感应熔化（VIM）和电渣重熔（ESR）通常用于生产比大部分钢都清洁的钢的三种专用炼钢工艺（参见本手册第2篇第2章）。

硫不仅要影响超高强度钢，它还会影响低到中强度牌号的钢（参考文献[12]）。这在很大程度上是由于微孔聚集机制起作用，而且如果画出硫化物夹杂物

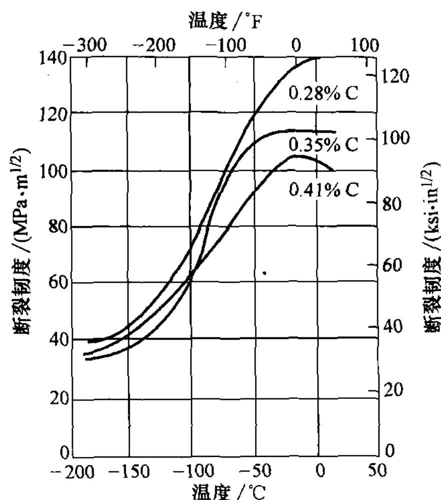


图2.3-96　含碳量和试验温度对合金钢的断裂韧度的影响。图中数据出自含（质量分数）0.65% Mn、0.35% Si、0.80% Cr、3.00% Ni、0.30% Mo、0.10V 及不同的含碳量的试验钢，所有的钢硬化并回火到屈服强度为 1175MPa（170ksi）。引自参考文献[8]、[9]

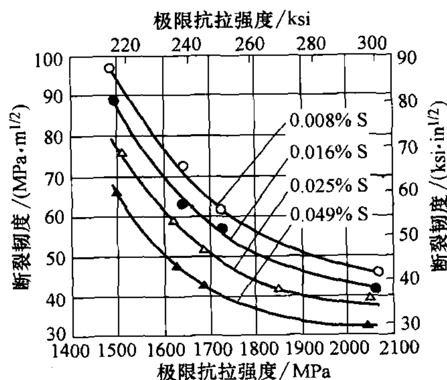


图2.3-97　通过硬化和回火到不同强度的4345钢的硫含量对断裂韧度的影响

长度对于裂纹尖端张开位移（CTOD）的曲线，则显示如图2.3-98a所示的反比关系。临界裂纹尖端张开位移 δ_c 也是一种断裂韧度的度量。在平面应变条件下，δ_c 与 K_{Ic} 之间存在着如下的近似关系：

$$\delta_c \approx \frac{K_{Ic}^{\ 2}}{2\sigma_{ys}E} \qquad (2.3\text{-}3)$$

式中，σ_{ys} 为屈服强度；E 为弹性模量。于是，作为改善韧性的一种方法就是通过控制夹杂物的形状来减小夹杂物的投影长度（参考文献[12]）。这可以通过加入稀土金属予以实现，它们能与硫化锰结合形成由硫化物、氧化物和/或硫氧化物组成的不易变形的颗粒。这种形状控制的方法大大改善了横向缺口冲击性能，如图2.3-98b所示的X-65管线钢（参考文献[13]）。如图2.3-98c所示，增加大炉次的管线钢中稀土金属的添加量将有可能提高其缺口韧性（参考文献[14]）。关于形状控制，路易克斯（Luyckx）等人证明（参考文献[15]）：当铈与硫之比为2并让硫化物实现从长形到球形的转变时，上平台冲击吸收功达到最大值。从图2.3-98d可以看出这一点。由于在从低强度到中等强度的钢里，硫化物的形状对于纵向断裂韧度并不构成特别的威胁，因此可以期待稀土金属的加入几乎不会对纵向性能产生什么影响。

微量元素的影响。其他合金元素的化学影响就是指会造成或影响回火脆性的一些影响。如表2.3-95所示，磷、硅、砷及锡的一些杂质都会因为引起回火脆性而降低 K_{Ic} 值。本手册其他地方也能找到有关脆化机制的内容。

显微组织和热处理的影响。高强度钢中由热处理引起的一般显微组织变化是借助奥氏体化的温度及其保持时间、淬火速度和回火温度及其保持时间而实现的。增加奥氏体化的温度及其时间会产生一种双倍的影响，即它会增加晶粒的大小和/或增加合金碳化生成物的固溶化。前者的影响会产生混合结果，即在1200℃（2200℉）温度下的奥氏体化比起使用传统方法更能提高AISI4340钢的尖锐裂纹断裂韧度，然而一些大的前期生成的奥氏体晶粒会形成较低的冲击韧度（参考文献[16]）。增加前期奥氏体晶粒大小会对其抗疲劳裂纹产生不利的影响（参考文献[17]）。另一方面，合理的奥氏体化温度和时间对于淬火前溶解碳化物的形成元素是很必要的。

不同的淬火速度由于形成不同的淬火后显微组织，从而再次影响合金钢的断裂韧性。在油中淬火的合金钢几乎能在淬火中获得100%的马氏体，然后在一定回火条件下形成的断裂韧度要高于淬火不完全和同样温度回火的断裂韧度。彼特曼（Peterman）和琼斯（Jones）（参考文献[18]）曾就D-6ac钢的经热处理飞机结构件讨论过这种条件。简要地说，在900℃（1650℉）奥氏体化、200℃（400℉）盐浴中淬火、再200℃（400℉）回火，最后形成的平均断裂韧度 K_{Ic} 为 57MPa · $m^{1/2}$（52ksi · $in^{1/2}$）；而在925℃（1700℉）奥氏体化、60℃（140℉）油淬、再200℃（400℉）回火，则最后形成的平均断裂韧度 K_{Ic} 为 101MPa · $m^{1/2}$（92ksi · $in^{1/2}$）。

用回火温度范围里较高部分的温度进行回火的超高强度钢所得到的效果是，其断裂韧度提高而屈服强度降低。在其中间部分，即200至400℃（400至750℉）之间的回火温度里进行回火不一定能取得这

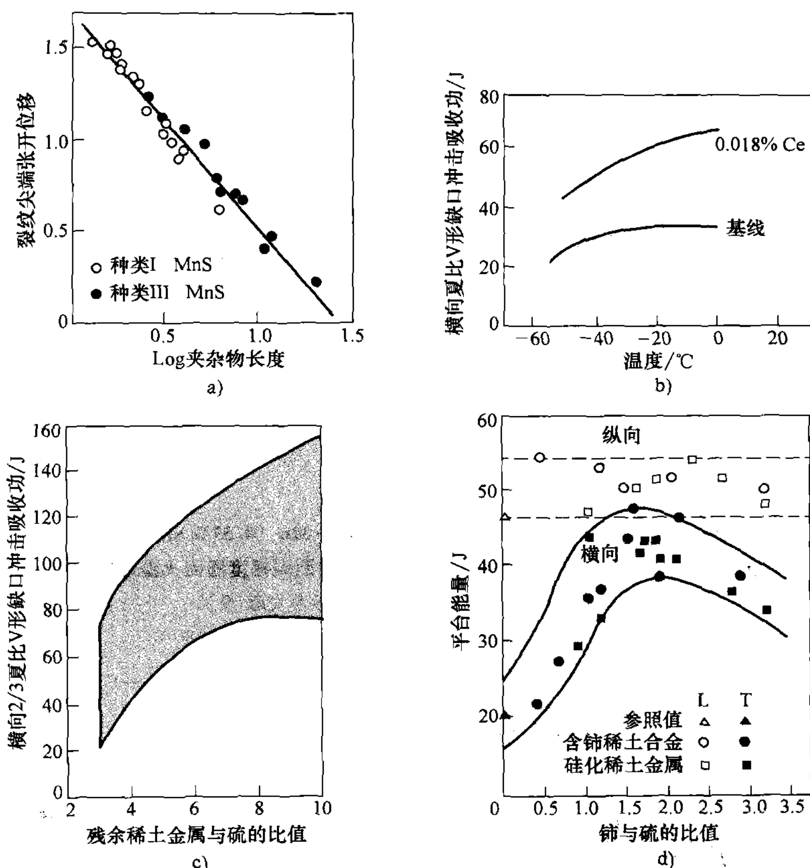


图2.3-98 硫化物夹杂对铁素体钢韧性的影响

a) 含硫钢中单位面积夹杂物的投影长度与达到断裂时的裂纹尖端张开位移之间的关系

b) 稀土金属添加量对铝-硅镇静的X-65管材钢冲击性能的影响 c) 在 -18℃(-1℉)(⅔大小的夏比试件)下，横向夏比V形缺口(CVN)能量和稀土金属、硫比值之间的关系 d) 用纵向和横向的½大小的夏比V形缺口试件所测定的平台能量与铈、硫比值(L,纵向;T,横向)之间的关系。引自参考文献[12]

些效果。如图2.3-99a所示，三种不同含镍量的钢在25℃(75℉)温度下的断裂韧度与其回火温度相对无关。然而在300℃(570℉)温度里进行回火的低镍钢在-73℃(-100℉)的温度下表现出严重的回火马氏体脆性。如图2.3-99b所示，加入3% Ni(质量分数)可以部分地降低这种脆性，若加入6% Ni(质量分数)就可以完全消除脆性。

为了提高较低强度钢的低温断裂韧度，减小铁素体或其前期奥氏体的晶粒大小是改善显微组织的有效方法。图2.3-100所示的两项研究结果表明，通过晶粒细化可以为高于-150℃(-240℉)的温度的断裂韧度取得显著的改进效果(参考文献[9]、[19])。从中还可看出，K_{Ic}与晶粒大小d之间可能存在着一些关系。这也可以分别从图2.3-101a和2.3-101b中的铁素体的晶粒大小(参考文献[20])或其前期奥氏体的晶粒大小(参考文献[21])中得到体现。于是很显然，作为提高低强度钢至中等强度钢的低温断裂韧度的目标之一就是细化晶粒，就如同在生产HSLA钢时所做的那样。通过少量的合金添加和降低热精轧的温度使得在这些钢的晶粒细化方面取得进展，从而使断裂韧度有了很大的提高。

应变率的影响。断裂韧度的转变温度不仅要随合金成分和屈服强度的变化而变化，而且还要因加载的速度而变化。在低、中强度钢中这是极为重要的，因为这些钢对应变率是很敏感的。图2.3-102所示就是其结果，从中可以看出，当应变率从$10^{-5}s^{-1}$增加到$10^{-3}s^{-1}$再到$10s^{-1}$时，A36钢所经历的转变温度的改变。显然，根据静态断裂韧度选择，这样的钢用于动态工作条件是非常危险的，除非其温度的改变在掌控之中。已经有一系列的研究(参考文献[23]~[25])表明，这种改变的幅度取决于屈服强度。巴什姆(Barsom)(参考文献[24])把这种关系表述为：

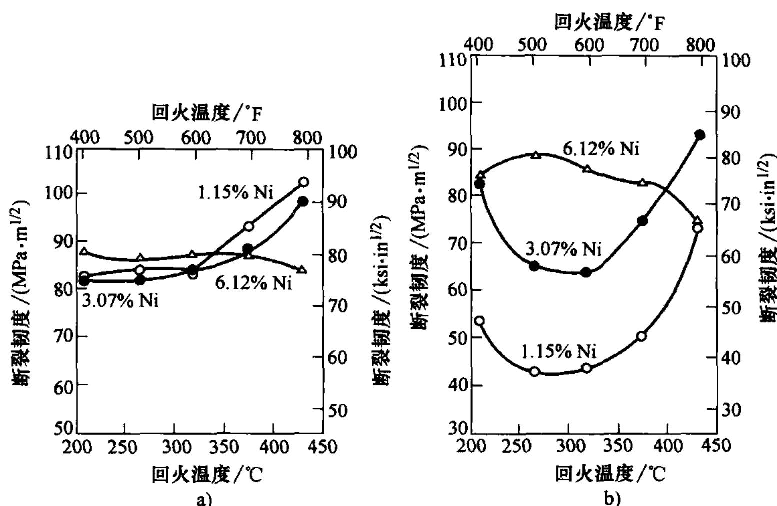


图 2.3-99　含有（质量分数）0.35% C、0.65% Mn、0.35% Si、0.80% Cr、0.30% Mo、0.10% V 及不同含量镍的钢缺口弯曲断裂韧度随回火温度的变化

a）在25℃（75℉）温度下测量（参考文献[9]）

b）在-73℃（-100℉）的温度下测量（参考文献[8]）

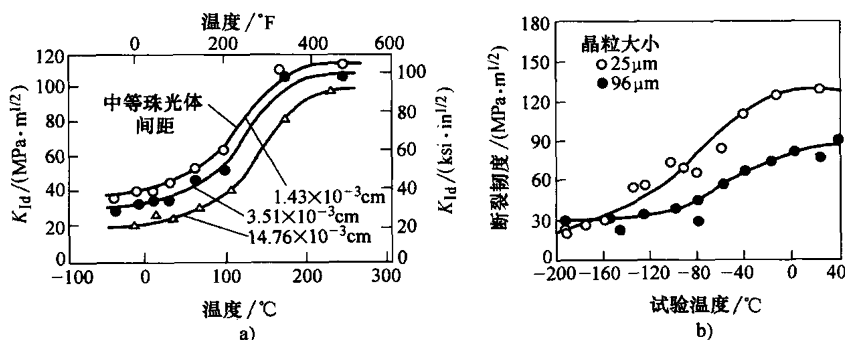


图 2.3-100　晶粒大小对断裂韧度的影响引自参考文献[9]、[19]

a）三种前期奥氏体晶粒大小作为温度函数的动态断裂韧度（K_{Id}）曲线

b）两种晶粒大小的标准37-3钢作为温度函数的断裂韧度

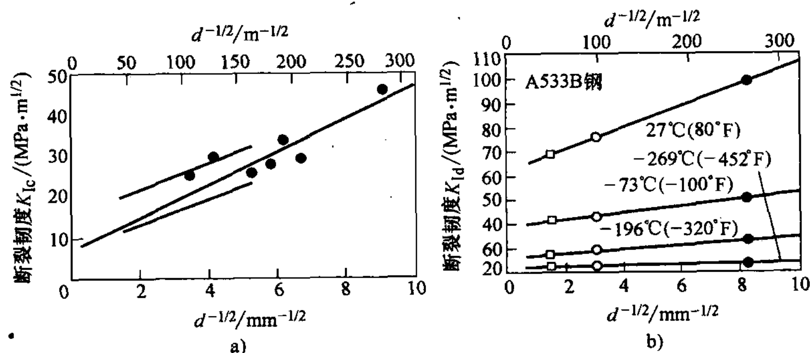


图 2.3-101　断裂韧度与晶粒大小的平方根倒数之间的关系

a）在-120℃（-184℉）的温度下，几种普通碳素钢的断裂韧度对铁素体晶粒大小的平方根倒数，引自参考文献[20]　b）在四种不同的温度下，断裂韧度对前期奥氏体晶粒大小的相关性，引自参考文献［21］

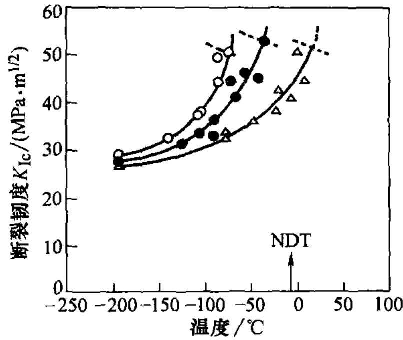


图 2.3-102 温度和应变率对 ASTM A36 钢的断裂韧度的影响。空心圆代表 K_{Ic}加载($\dot{\varepsilon}\approx10^{-5}s^{-1}$)；实心圆代表中等应变率加载($\dot{\varepsilon}\approx10^{-3}s^{-1}$)；空心三角代表动态加载($\dot{\varepsilon}\approx 10s^{-1}$)。引自参考文献［22］

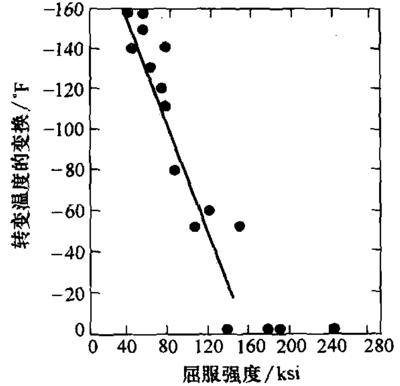
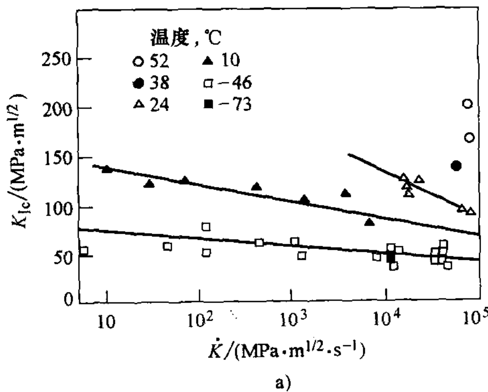


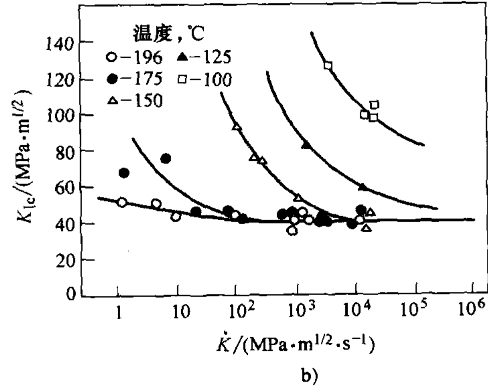
图 2.3-103 屈服强度对在冲击和静态平面应变断裂韧度曲线之间发生变换的转变温度影响。引自参考文献［22］

$$T_{改变}(℃)=119-0.12\sigma_{ys} \quad (2.3\text{-}4)$$

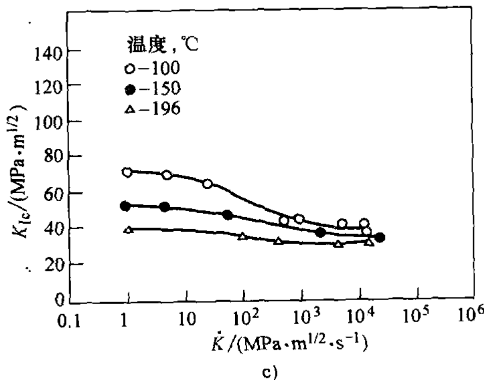
对于强度范围在 250MPa < σ_{ys} < 965MPa(36ksi < σ_{ys} < 139ksi)的钢，可从图 2.3-103 中看到，当屈服强度大于 965MPa(139ksi)左右时并没有转变温度的改变。这已经由浦利斯特(Priest)以大量的从低强度钢到中强度钢的试验所验证，其中的一些试验如图 2.3-104 所示。为了求得断裂韧度，采用多达六种的试验温度和六种加载速率($\dot{K}$㊀,MPa · m^{½} · s^{-1})的大



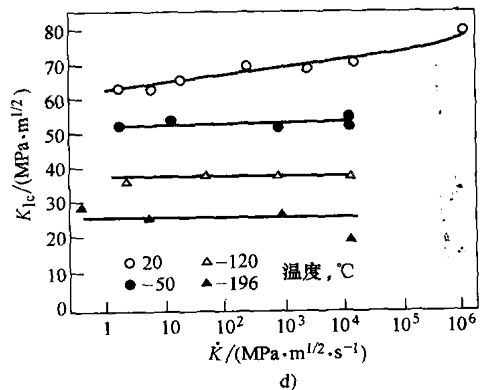
a)



b)



c)



d)

图 2.3-104 温度和加载速率对断裂韧度的影响。屈服强度在室温下测得，引自参考文献［10］

a) A533B 钢；$\sigma_{ys}\approx$450MPa(65ksi) b) 淬火和回火 0.18C-1.2Mn-0.9Cr-1.1Ni-0.45Mo-0.07V 钢；$\sigma_{ys}\approx$600MPa(87ksi) c) 0.3C-3.5Ni-1.7Cr-0.6Mo-0.15V 转子锻钢；$\sigma_{ys}\approx$670MPa (97ksi) d) 0.4C-9Ni-1.7Cr-4Co 钢；$\sigma_{ys}\approx$970MPa(140ksi)

㊀ 原文为 K，但与图对应来看应为 $\dot{K}$。——译者注。

小数量级，从中可以看到低强度钢有明显的改变。然而对于如图 2.3-104d 所示的屈服强度为 970MPa (140ksi)的钢来说，虽然断裂韧度随试验温度而变化却没有随加载速率而变化。对于强度低于 965MPa (139ksi)的钢(参考文献[22])，巴什姆(Barsom)将屈服强度与范围为 $10^{-3}s^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10s^{-1}$ 的应变率的综合效应表示为：

$$T_{改变}(℃) = 83 - 0.08\sigma_{ys})\dot{\varepsilon}^{0.17} \qquad (2.3\text{-}5)$$

$\dot{\varepsilon}$ 的单位为 s^{-1}[式(2.3-5)中似缺少括号"(",但原文如此。——译者注]。

参考文献

[1] D. Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 3rd ed., Nijhoff, 1981.
[2] J.F. Knott, *Fundamentals of Fracture Mechanics*, Butterworths, 1973.
[3] M.F. Kanninen and C. Popelar, *Advanced Fracture Mechanics*, Oxford University Press, 1985.
[4] H. Tada, P.C. Paris, and G.R. Irwin, *Stress Analysis of Cracks Handbook*, Del Research Corporation, Bethlehem, PA, 1973.
[5] G.C. Sih, *Handbook of Stress Intensity Factors*, Lehigh University, Bethlehem, PA, 1973.
[6] K.S. Ravichandran and A.K. Vasudevan, Fracture Resistance of Structural Alloys, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, 1996, p 381–392.
[7] *Alloying Elements in Steel*, 2nd ed., E.C. Bain and H.W. Paxton, Ed., American Society for Metals, 1961
[8] C. Vishnevsky, "Effect of Alloying Elements on Tempered Martensite Embrittlement and Fracture Toughness of Low Alloy High Strength Steels," Report CR-69–18(F), Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA, Jan 1971.
[9] C. Vishnevsky and E.A. Steigerwald, "Influence of Alloying Elements on the Toughness of Low Alloy Martensitic High Strength Steels," Report CR 68–09(F), Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA, Nov 1968.
[10] A.H. Priest, Influence of Strain Rate and Temperature on the Fracture Toughness and Tensile Properties of Several Metallic Materials, *Dynamic Fracture Toughness*, M.G. Dawes, Ed., The Welding Institute, Cambridge, 1977, p 95–111.
[11] R.P. Wei, Fracture Toughness Testing in Alloy Development, *Fracture Toughness and its Applications*, STP 381, ASTM, 1965, p 279–289.
[12] P.E. Waudby, Rare Earth Additions to Steel, *Int. Met. Rev.*, Review 229, No. 2, 1978, p 74–98.
[13] W.G. Wilson and G.J. Klems, Impact Toughness of Fuel Pipelines Demands on Steel Cleanliness, *Ind. Heat.*, Oct 1974, p 12–16.
[14] H.J. Kirsching, H.J. Hornbeck, H. Schenk, and C. Carius, Effect of Cerium on the Properties of a Stainless Chromium Nickel Steel, *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol 34 (No. 4), 1963, p 269–277.
[15] L. Luyckx, R.J. Bell, A. McLean, and M. Korchynsky, Sulfide Shape Control in High-Strength Low-Alloy Steels, *Metall. Trans.*, Vol 1(No. 12), 1970, p 3341–3350.
[16] R.O. Ritchie and R.M. Horn, Further Considerations on the Inconsistency in Toughness Evaluation of AISI 4340 Steel Austenitized at Increasing Temperatures, *Metall. Trans., A*, Vol 9 (No. 3), March 1978, p 331–341.
[17] R.O. Ritchie, Near-Threshold Fatigue-Crack Propagation in Steels, *Int. Met. Rev.*, Vol 24 (No. 5, 6),1979, p 205–230.
[18] G.L. Peterman and R.L. Jones, Effects of Quenching Variables on Fracture Toughness of D6ac Steel Aerospace Structures, *Met. Eng. Quart.*, Vol 15 (No. 2), May 1975, p 59–64.
[19] W. Dahl and W.B. Kretzchmann, Influence of Precracking and Grain Size on Fracture Toughness of Structural Steels, *Fracture 1977*, Vol 2A, D.M.R. Taplin, Ed., Pergamon Press, 1977, p 17–21.
[20] D.A. Curry and J.F. Knott, The Relationship between Fracture Toughness and Microstructure in the Cleavage Fracture of Mild Steel, *Met. Sci*, Vol 10, 1976, p 1–6.
[21] F.R. Stonesifer and R.X. Armstrong, Effect of Prior Austenite Grain Size on the Fracture Toughness Properties of A 533 B Steel, *Fracture 1977*, Vol 2A, D.M.R. Taplin, Ed., Pergamon Press, 1977, p 1–6.
[22] J.M. Barsom, Effect of Temperature and Rate of Loading on the Fracture Behavior of Various Steels, *Dynamic Fracture Toughness*, M.G. Davies, Ed., The Welding Institute, Cambridge, 1979, p 113–125.
[23] J.M. Barsom and S.T. Rolfe, The Correlations between K_{Ic} and Charpy V Notch Test Results in the Transition Temperature Range, *Impact Testing of Metals*, STP 466, ASTM, 1970, p 281–302.
[24] J.M. Barsom, Development of the AASHTO Fracture-Toughness Requirements for Bridge Steels, *Eng. Fract. Mech.*, Vol 17 (No. 3), 1975, p 605–618.
[25] R. Roberts, "Fracture Toughness of Bridge Steels, Phase II Report," Report FHWA-RD-74–59, Federal Highway Administration, Sept 1974.

第 14 节 碳素钢和合金钢的腐蚀特征

腐蚀环境的类型

金属腐蚀的定义是金属与周边环境发生的化学或电化学反应而造成金属的劣化。通常腐蚀介质是一种液体，但是气体和固体也可以成为腐蚀介质。

一般将腐蚀的介质分类成水性的和非水性的。水性介质包括所有各种类型的水——天然的、纯净的和污染的——其范围从相对什么溶解物质几乎都不含的去离子水和蒸馏水，到含有高达 10000ppm 或更多的各种矿物质或污染物质的天然淡水，直到矿物水、深井盐水、海水以及可能含有百分之几的一种或多种的溶解化学物质，如酸、碱、盐和气体的特种工艺水。

非水性的相关物质包括气体、有机液体和液态金属。

水性介质引起的腐蚀

无论何处只要存在水就能预期铁和钢会通过电化

学作用发生腐蚀——即在金属表面形成局部的阳极区(活性的)和阴极区(惰性的)，并且在阳极部位发生腐蚀(氧化)：$Fe^0 \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$。在阴极部位发生还原反应，根据环境的 pH 值可以是氢析($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow$)或是氧还原[$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH)^-$]。从阳极释放出来的电荷通过金属流向阴极，在那里通过阴极反应被消耗掉。在接近中性或碱性的溶液里，必须存在着一些溶解氧或其他还原物质以支持阴极还原，并因此发生相应的腐蚀。溶解盐类的存在一般会增加溶液的腐蚀率，因为它们能提高溶液的导电性，并因此加大腐蚀电流。

原电池是通过将铁或钢置于水性溶液里而建立的，这时铁质金属与另外一种其电池电位比铁金属更为惰性(即更加阴极化)的金属处于一种电接触状态。在这种情况下，铁金属上较大的部分变成阳极，故腐蚀率也因此提高。当铁金属的局部区域受到隔离并与含氧水溶液脱离接触时也能形成电池，称之为氧浓差电池腐蚀或称为隙间腐蚀(因为常能从间隙中看到这种腐蚀,其边缘容易接触氧气,而氧气却相当难以进入其内)。

某些水，即使不被认为是水性介质，也是一种活跃的腐蚀剂。若铁金属的表面经常处于潮湿的空气里，比如在一些在夜里常生成露水的地方，其腐蚀就会加快进行。

非水性介质引起的腐蚀

除了液态金属以外，最为常见的大多数的非水性介质腐蚀都是由直接化学反应所造成的，并导致金属的脱落(如空气中的高温氧化)或生成改性表面层(如渗碳、氮化)。在常温里，大部分的干燥气体和有机液体对于钢都是非腐蚀性的，但是在高温下会变为腐蚀性的。

在液态金属系统里的腐蚀几乎总是包含着某种形式的溶解或浸析，这时原子离开固体表面并进入液态金属的溶液里。在一个流动的系统里尤其在循环系统中，腐蚀过程常受制于系统从最热点到最冷点之间的温度差，因为随温度的升高，溶解度也要增加。

碳素钢和低合金钢会因为接触液态的黄铜、铝青铜、铜、锌、铅-锡软钎料、锂、镉和铟而发生脆化。钢通过热处理和合金化而形成的强度越高，其脆化的程度也就越大。

在大气中的腐蚀

所有暴露在大气里的、未经防护的碳素钢和合金钢都要发生一定程度的腐蚀。对于不含合金成分的铁，其腐蚀过程发生得相对较快，特别是在含有特殊大气污染物的潮湿空气中。加入特定的合金元素——主要如硅、铜、铬和镍可以降低腐蚀的速度。每一种合金元素所减缓的腐蚀效果的大小取决于暴露的气候条件和加入的合金元素量。

铁金属的大气腐蚀是通过电化学反应进行的，在反应过程中，电解液是以当相对湿润空气的温度降低时空气里的潮气——无论是如水汽那样沉降，还是像露水那样凝结在其裸露表面——为依据的。

地理和气象因数

一般都认为，都市里造成铁金属腐蚀的环境污染物主要来源于发动机燃油的氧化硫气体。空气中来源于海洋的海水水珠会加速沿海地区的腐蚀。空气中来源于西部地区的干燥土壤中的盐分以及随风飘来的肥料再加上来自于乡村地区的硅质和钙质的尘土同样也会加速铁金属的腐蚀。而补充这些离子材料的是一些非离子的灰尘粒子，它在露水的凝结中起到了成核作用。

露水的作用

露水的凝结可以说是促成腐蚀的一个主要因素。据有关报告称，从半工业化地区凝结的露水具有的 pH 值为 4.5，而从东部工业化地区多收集的雨水加上露水所具有的 pH 值为 3.5。如此的数值说明，其酸性已足够通过酸性侵蚀来引发对碳素钢的腐蚀。露水通过对微小粒子的成核，使气体污染物溶解，随后将二者从空气中清除并凝结在表面上，以此清洁大气。遗憾的是，正是这种凝结露水在损坏金属和水泥。

碳素钢

多年以来，ASTM A-5 委员会(正式称为美国试验和材料学会)发布了为不同试验场提供的作为其标定用的碳素钢试件。从 1960 到 1964 年，委员会为 46 个地方发布了为期一年和两年的碳素钢试件，其中 14 处在国外。其覆盖范围从热带到极地、从工业区到乡村，还从沿海地区到干旱地区。在 46 个中的 34 个地区，试件经过两年的暴露，其平均腐蚀速率如表 2.3-97 所示。在极地诺曼·威尔斯(Norman Wells)与靠近热带的开普·肯尼迪(Cape Kennedy，压海)之间的腐蚀率的差别，最大可达 1400 倍；在干旱乡村的霍尼克斯(Phoenix)与乡村斯黛特·考瑞吉(State College)之间有 5 倍的腐蚀率差距。而在乡村斯黛特·考瑞吉(State College)与工业区纽沃克(Newark)之间只存在 2 倍的差距。当未经防护的碳素钢构件暴露于特定的地区时，可以将这些数据作为大气腐蚀性的一种初步评定。

表 2.3-97 不同地区的碳素钢腐蚀速率

地 区	环境种类	腐蚀速率[①]	
		μm/a	mil/a
加拿大，西北特区，诺曼威尔士 Norman Wells，NWT，Canada	极地	0.76	0.03
亚利桑那州，凤凰城 Phoenix，AZ	干旱乡村	4.6	0.18
加拿大，温哥华岛，埃斯奎莫尔特 Esquimalt，Vancouver Island，BC，Canada	沿海乡村	13	0.5
密歇根州，底特律 Detroit，MI	工业区	14.5	0.57
巴拿马，福特阿玛多尔 码头 Fort Amidor Pier，CZ	沿海	14.5	0.57
密歇根州，莫伦西 Morenci，MI	都市	19.5	0.77
宾夕法尼亚州，波特县 Potter County，PA	乡村	20	0.8
康涅狄格州，沃特伯里 Waterbury，CT	工业区	22.8	0.89
宾夕法尼亚州，斯泰特科利奇 State College，PA	乡村	23	0.9
加拿大，蒙特利尔 Montreal，QC，Canada	都市	23	0.9
新罕布尔州，达勒姆 Durham，NH	乡村	28	1.1
俄亥俄州，米德尔敦 Middletown，OH	半工业区	28	1.1
宾夕法尼亚州，匹兹堡 Pittsburgh，PA	工业区	30	1.2
俄亥俄州，哥伦布 Columbus，OH	工业区	33	1.3
加拿大，不列颠哥伦布，特雷尔 Trail，BC，Canada	工业区	33	1.3
俄亥俄州，克利夫兰 Cleveland，OH	工业区	38	1.5
宾夕法尼亚州，伯利恒 Bethleham，PA	工业区	38	1.5
英格兰，伦敦，巴特西 London，Battersea，England	工业区	46	1.8
宾夕法尼亚州，巴罗维尔 Monroeville，PA	半工业区	48	1.9
新泽西州，纽沃克 Newark，NJ	工业区	51	2.0
菲律宾，马尼拉 Manila，Philippine Islands	热带沿海地区	51	2.0
巴拿马，利蒙湾 Limon Bay，Panama，CZ	热带沿海地区	61	2.4
新泽西州，巴约纳 Bayonne，NJ	工业区	79	3.1
印第安纳州，东芝加哥 East Chicago，IN	工业区	84	3.3
德克萨斯州，布拉索斯河 Brazos River，TX	沿海工业区	94	3.7
佛罗里达，肯尼迪海角 Cape Kennedy，FL（60ft 高，离海边 60yd）	沿海地区	132	5.2
北卡罗来纳州，库尔比奇 Kure Beach，NC（离海边 800ft）、	沿海地区	147	5.8
佛罗里达，肯尼迪海角 Cape Kennedy，FL（30ft 高，离海边 60yd）	沿海地区	165	6.5
佛罗里达，代托纳比奇 Daytona Beach，FL	沿海地区	295	11.6
佛罗里达，肯尼迪海角 Cape Kennedy，FL（地面高，离海边 60yd）	沿海地区	442	17.4
加利福尼亚州，波恩特雷耶斯 Point Reyes，CA	沿海地区	500	19.7
北卡罗来纳州，库尔比奇 Kure Beach，NC（离海边 80yd）	沿海地区	533	21.0
巴拿马，加莱奥塔角 G aleta Point Beach，Panama，CZ	沿海地区	686	27.0
佛罗里达，肯尼迪海角 Cape Kennedy，FL(海滨)	沿海地区	1070	42.0

①两年平均值。

高强度低合金(HSLA)钢

导致高强度低合金钢开发的一个重要发现就是若碳素钢里的 w(Cu)为0.05%～0.2%，将能使其耐大气腐蚀的能力得到提高。D. M. 巴克(Buck)曾进行过一种最早的系统性研究(1913年)，用两种不同铜含量(w(Cu)为0.15%和0.25%)的波纹碳素薄钢板制成18°斜屋顶的户外构件，发生重量损耗的试件同时暴露在大气中。从三个不同的环境里——严重工业区、沿海地区和乡村所试验得到的结果表明铜能减少腐蚀。在工业区，含铜的钢比不含铜的钢的重量少损耗40%～48%。在沿海地区，含铜的钢比不含铜的钢的重量少损耗51%～61%。

成分的影响。由拉勒比(Larrabee)和寇本(Coburn)提出的系统性研究报告包含了270种钢在上述三种地区历时15.5年的腐蚀试验结果。所研究的合金元素有铜、镍、铬、硅和磷，其含量(质量分数)均低于1.3%。研究发现，所有这些元素都是有益的，其中使耐腐性变化最大的是铜含量的增加。工业区选取了新泽西州的Kearny，半乡村选取了宾夕法尼亚州的南Bend，沿海地区则选取了北卡罗来纳州的Kure海滨，离海边大约240m(800ft)。图2.3-105概括了在工业区的一些试验结果。“HSLA钢”(位于底部的曲线)与ASTM A242进行比较，后者包括建筑牌号的含铜耐候钢。

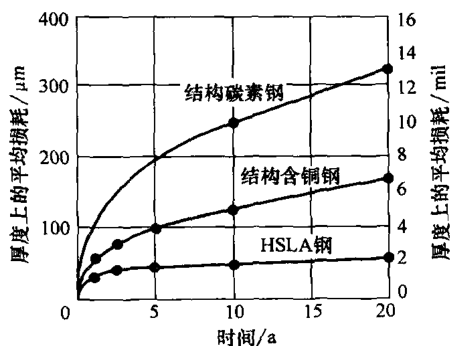


图2.3-105　在半工业区和工业区环境里的大气腐蚀与时间的关系

在所选环境里的腐蚀。表2.3-98所示是碳素钢与含铜钢以及与ASTM的A 242、A 588、A 514和A 517有关HSLA钢在不同的乡村、工业区和沿海地区环境里所进行的比较。与结构含铜钢和结构碳素钢相比，所有高强度低合金钢的性能都有明显的改善。

表2.3-98　不同环境中结构钢的腐蚀

大气种类	厚度平均减薄①/mil						
	时间/a	结构碳素钢	结构含铜钢	UNS K 11510②	UNS K 11430③	UNS K 11630④	UNS K 11576⑤
工业区(Newark, NJ)	3.5	3.3	2.6	1.3	1.8	1.4	2.2
	7.5	4.1	3.2	1.5	2.1	1.7	—
	15.5	5.3	4.0	1.8	—	2.1	—
半工业区(Monroeville, PA)	1.5	2.2	1.7	1.1	1.4	1.2	1.6
	3.5	3.7	2.5	1.2	2.1	1.4	2.4
	7.5	5.1	3.2	1.4	2.4	1.7	—
	15.5	7.3	4.7	1.8	—	1.8	—
半工业区(South Bend, PA)	1.5	1.8	1.4	1.0	1.3	1.0	1.5
	3.5	2.9	2.2	1.3	1.9	1.5	2.4
	7.5	4.6	3.2	1.8	2.7	1.9	—
	15.5	7.0	4.8	2.2	—	2.5	—
乡村(Potter County, PA)	2.5	—	1.3	0.8	1.2	—	—
	3.5	2.0	1.7	1.1	1.4	1.2	1.8
	7.5	3.0	2.5	1.3	1.5	1.5	—
	15.5	4.7	3.8	1.4	—	2.0	—
中度沿海地区(Kure Beach, NC, 离海边800ft)	0.5	0.9	0.8	0.6	0.8	0.7	1.0
	1.5	2.3	1.9	1.1	1.7	1.2	1.7
	3.5	4.9	3.3	1.8	2.5	1.9	2.2
	7.5	5.6	4.5	2.5	3.7	2.9	—

（续）

大气种类	厚度平均减薄①/mil						
	时间/a	结构碳素钢	结构含铜钢	UNS K 11510②	UNS K 11430③	UNS K 11630④	UNS K 11576⑤
重度沿海地区（Kure Beach，NC，离海边80ft）	0.5	7.2	4.3	2.2	3.8	1.1	0.7
	2.0	36.0	19.0	3.3	12.2	—	2.1
	3.5	57.0	38.0	—	28.7	3.9	3.9
	5.0	⑥	⑥	19.4	38.8	5.0	—

①1mil≈25μm。　②ASTM A242（类别1）。　③ASTM A588（牌号A）。　④ASTM A514（类别B）和ASTM A517（牌号B）。
⑤ASTM A514（类别F）和ASTM A517（牌号F）。　⑥试件完全腐蚀。

在土壤中的腐蚀

土壤腐蚀可以认为是围绕埋在土壤里的构件外表发生的所有腐蚀。土壤腐蚀是因为低pH值、杂散电流、反应化学物质、低电阻率和细菌作用等因素而引起的，但是氧气和水作为关键性因素是腐蚀所不可或缺的。

土壤的特征

土壤是一种混杂不一的疏松材料，其性质范围从松软泥土、软粘土、细粘土、泥沙，直到粗粒砂和砾石。在美国有两大类土壤，即密西西比河西部的土壤，其中普遍积聚了氧化钙，呈碱性；而密西西比河东部的土壤与此不同，呈酸性。土壤的种类还能按照不同粘土、泥砂和砂石的含量组成进行细分。很松软的土壤由于存在三价铁的铁化合物而呈现为红色、黄色或棕色，灰土壤中含有二价铁化合物，黑土壤则含有腐殖质。用于腐蚀研究的土壤分析只针对以水溶性化合物而存在的物质，包括钠、钾、钙和镁的碱性生成物以及碳酸盐、碳酸氢盐、氯化物、氮化物和硫化物的酸性生成物。

透气性和含水性是土壤的主要物理属性。具有很好的排水性和充足的透气性的粗土壤（砂子和砾石）以接近当地大气的速率对钢进行腐蚀。粘土和泥沙性土壤的特点是结构细腻、保水性好、透气性差及排水性差，所有这些都会增加对钢的腐蚀速率。最严重的腐蚀通常发生在海拔低、排水性差的土壤里，该土壤的透气性也是最差的。

通气差异。由透气性的差异所引起的腐蚀是在多种不同的情况下发生的。例如，当一根钢管子穿过两种具有不同氧透气性的土壤时，将形成一种动电电流（galvanic current）沿管子表面从土壤透气性较差（阳极）的表面流向透气性较好（阴极）的表面。若这两种表面状态相隔较远，则能够检测出所谓长线电流的动电电流，并用于确定阳极区域的位置。

溶解盐。腐蚀性最强的土壤就是那种含有高浓度的可溶性盐的土壤。由于盐类的存在，这种土壤具有相对较高的导电性（或低电阻率）。腐蚀性最低的土壤含有低浓度的可溶性盐，并有高电阻率。电阻率的测量可以很容易地进行，就像测量土壤中的各种其他性质一样，能从中获取大量的腐蚀特征数据。因此电阻率是一种估计土壤侵蚀性的最常用性质。土壤排水量的测定和/或pH值的测量可以作为电阻率测量的补充。下表所示就是存在于土壤里的电阻率与铁质金属腐蚀之间的一般性关系，因为其他因素的这种关系并不一定有效。

土壤电阻率/（Ω·m）	腐蚀性类别
<7	非常强的腐蚀
7~20	腐蚀的
20~50	中度腐蚀的
>50	轻度腐蚀至无腐蚀

细菌作用

细菌作用是影响地下腐蚀的又一个因素。在土壤里的各种细菌中，厌氧硫酸盐-还原细菌是最要关注的。这种细菌能像去极化剂的阴极反应 $H_2O + e^- \rightarrow H^0 + OH^-$ 一样地起作用，从而使得腐蚀能在无氧土壤里进行。应该注意的是适合这种细菌活动性的条件（可溶性硫酸盐）可以用上面所述的电阻率的测量进行检测。

防护措施

虽然也常用如保护性镀层的一些其他防腐方法

来对付钢在土壤中的腐蚀，但是阴极保护法仍被认为是最为经济和最为有效的方法。阴极保护法有两大优点：首先，它不仅能按现有的结构零件改造使用，而且通常只需为构件的更换花费很少的成本，还不会使设施或应用受到损坏；第二，可以利用简单的无损电学测量方法检测阴极保护抑制腐蚀的有效性。

在混凝土中的腐蚀

在混凝土中的腐蚀过程有可能形成一种加速侵蚀进行的条件。这种现象跟以下事实有关，即由铁和钢所形成的各种腐蚀生成物比其钢本身具有较大的特定体积。腐蚀生成物体积的增大会产生导致混凝土开裂的应力，而这些裂纹又会使侵蚀介质更容易深入，以致侵蚀得也更快。一旦裂纹扩张到外表面，腐蚀生成物就会被冲洗出来并形成构件装饰上的污渍。更为严重的问题是当这种材料中的腐蚀过程发生在预应力混凝土构件上时，会造成结构强度的丧失直至最终破坏。

氯化物离子的存在是混凝土中钢腐蚀的主要原因之一。它们来源于空气中的污染物或防冻盐。为了减少或防止腐蚀问题的发生，人们致力于在钢的零件上使用各种保护层（镀锌、油漆等）来降低水泥的透气性、增加水泥的覆盖深度，或通过使用密封剂来消除氯化物离子等。尽管许多类似方法都显示了不同程度的有效性，但阴极保护确实是遏制腐蚀的最为成功的方法。

没有任何充足的依据可用于说明腐蚀的严重程度与钢的强化剂成分之间的关系。这可能是因为虽然合金化能从整体上降低侵蚀的速率，但是由于成本的增加，也不能肯定这种降低是否有意义。ASTM A706规定的一些HSLA混凝土钢筋用于一些特殊用途。

在淡水中的腐蚀

淡水包括所有各种在内陆发现的污染或无污染的无盐天然水，以及如溪、河、池塘和湖泊的水。除了源自于从天上降落的雨水和雪水的无盐天然水以外，淡水还包括井水、经处理的饮用水和各种工艺用水，后者能或不能处理以及能或不能有比天然水更高含量的污染物，这些水都是由天然水经处理而得的。关于与淡水接触的软钢有效寿命的数据，若没有下列信息都是不齐全的：①水的矿物质品质；②酸度；③是否含有溶解氧；④流速；⑤温度；⑥环境条件，例如腐蚀生成物沉积的不均匀性、与含铜金属的接触以及存在的裂隙。所有这些都会导致严重的局部腐蚀。

溶解气体的影响

水里能影响腐蚀速率的所有特征中，溶解在里面的气体也许是最为重要的。

氧气。氧气到达金属表面的速度能控制腐蚀的速度，还能确定其腐蚀结果是属于喜气还是厌气。此外，氧气还能加速二氧化碳、硫化氢和其他所溶解的气体与固体的作用。

二氧化碳。其腐蚀性大约只有氧气的1/10，并且在天然水中，二氧化碳的浓度仅仅当其影响碳酸钙的溶解度和沉淀性时，才显得重要。

硫化氢。它会造成钢的快速侵蚀，甚至在缺氧的条件下，它也会造成铸铁严重的石墨腐蚀。厌氧腐蚀的生成物为硫和硫化铁，相对于铁，两者都是阴极并都有可能造成严重的点蚀。当硫化氢是由细菌生成时，则多半的腐蚀问题都是由于这种化学物质而引起的。

pH的影响

浸于pH值为4.5~9.5的天然水里的钢，其腐蚀率几乎没有什么不一样。这可以从在自来水和蒸馏水里得到证实。在上述范围的pH值内，钢表面上腐蚀生成物的pH值保持在9.5，这与其溶液的pH值无关。当pH值为4或其以下时，氢开始逸出而腐蚀将加速进行（见图2.3-106）。

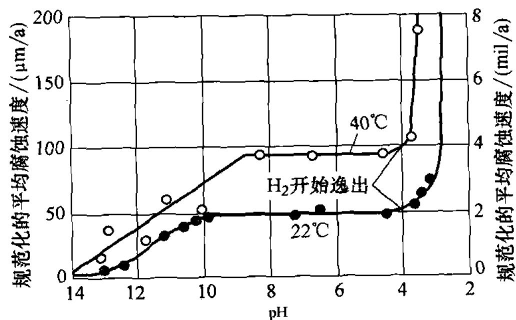


图2.3-106 在通气水中的，pH值对钢腐蚀的影响。腐蚀速率按每1L水含1mL的O_2规范化。将由这个图里得到的值乘以氧的浓度（mL/L）就可估算出其他浓度里的腐蚀速率

溶解盐的影响

大部分溶解在水里的盐都倾向于降低氧气和氢化铁的溶解度。因此，浓盐溶液里的腐蚀速度一般都低于其稀溶液的。某些盐还倾向于降低pH值，以此克

服其酸性腐蚀的倾向。另一方面，大部分的溶解盐都会被离子化并增加水的电导率，而反过来引发腐蚀局部化，因此导致严重点蚀。电导率的增加还会使阴极区变得更大，以致使阳极和阴极反应的生成物结合在水中而不是在金属表面。正离子按照以下顺序激发腐蚀(由小至大)：镁、镉、锰、钙、锶、钡、锂、钠、钾、铵(基)、三价铬和三价铁。

铵盐和如铬和铁的三价元素盐，由于其水解作用而形成酸性条件，以此大大激发腐蚀的发生。于是，通过氢气的逸出以及氧气的去极化作用而发生腐蚀。氯化铵的活性特别大，甚至在浓度低至 10ppm 时仍很大。

铜铁和汞铁。某些可溶性离子，尤其是铜和汞，能进行一种称为相互替代的反应，在其反应中，溶解离子(惰性比铁大)沉积在铁或钢的表面上，并有相等数量的铁原子进入溶液。这种替代反应能在缺氧的情况下发生，并且通过一种尚不清楚的抑制剂来防止这种反应的发生。

碱金属盐。当锂、钠或钾盐加入通风的水中时，腐蚀的速率将随浓度变化。在低浓度下，碱金属盐的加入会提高腐蚀速率；在较高的浓度下，腐蚀速率会达到最大值，然后随浓度的增加而降低，如图 2.3-107所示。

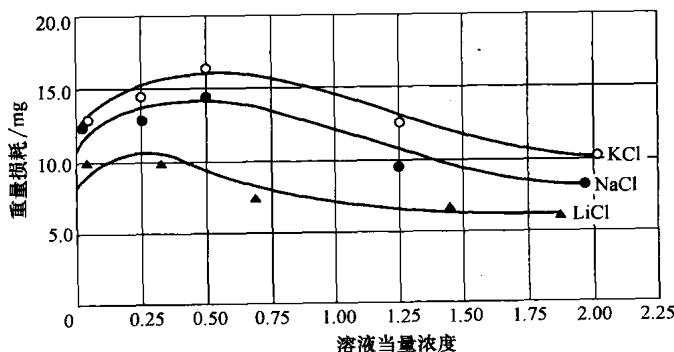


图 2.3-107　在35℃(95℉)的温度里，碱金属盐浓度对钢腐蚀的影响

在饮用水系统里的腐蚀

钢管并不能用于家庭饮用水。其他钢制容器很少未经，如锌、水泥、搪瓷、油漆、沥青或含沥青产品的涂层保护就用于居民或工业用水中，或应用于水的输送分配系统上。这类涂层不仅对减少腐蚀是必要的，而且还能防止出现红水。在一些涂层或接头的空隙中，若存在腐蚀性的水，暴露在里面的钢则免不了要遭受其腐蚀；只有在非侵蚀性的水或已经过适当抑制剂处理的水里，或使钢置于阴极保护之中，钢才能保持不受侵蚀。

天然水中的腐蚀

用于制造构件、桩材和给水管材的钢都要完全或部分地浸没于各种天然水里。在所有实际应用中，腐蚀率不只是受天然水里的主要成分(即氧含量)的影响；还要受所含的矿物质或工业污染物，或两者共同的影响。水的主 pH 值以及水在所浸泡的钢构件周围的运动程度(会形成湍流、层流或滞流)也会影响腐蚀速率。如果不通过现场的腐蚀试验，想要以一定合理的确定性预估其使用寿命往往是不可能的。

在海水中的腐蚀

海水是一种相对均匀的含盐溶液，其水里明显含有溶解的氯化钠和氯化钾。尽管它还存在着非常少量的若干其他可溶性矿物质，但是这些矿物质的单独和累计的影响都极大地被氯化物的突出影响所掩盖，以致海水被认为只是一种相当于 0.5*N*(当量浓度)的氯化钠溶液。在此浓度下，氯化钠溶液具有最高腐蚀性，其对钢的侵蚀作用超过更高或更低的浓度。除氯化物浓度外，其他影响海水腐蚀性的因素包括氧含量、生物附着物、水流速度和水温。后面将要讨论这些因素。

最常说的碳素钢在海水里的腐蚀速率是 5mil/a(130μm/a)。这种速率八年内都是呈线性的。大约八年后，腐蚀速率将下降到一个稳定的较低速率。举一个例子说，根据对位于圣·巴巴拉(Santa Barbara)海峡浸没于未经污染的海水里的 H-桩钢的考察发现，20 年间因腐蚀造成的损耗约为1mm(40mil)或 50μm/a (2mil/a)，此后减到约 25μm/a(1mil/a)。

在如海湾和河口处的微量盐水中的腐蚀，在一定程度上与海水里的腐蚀相类似。然而，由于许多河口水具有周期性倒流的特点以及某些其他特点，所以河口水处的腐蚀形式与普通海水的形式有所不同。

轧制铁鳞的影响。不管是用重量损耗还是用最大蚀点深度的方法测量，全世界的腐蚀速率都差不多。然而，在几乎所有的情况下，对于覆盖着轧制铁鳞的碳素钢试件测得的最大凹点深度大大深于没有轧制铁鳞的试件测得的深度，如表 2.3-99 所示。相对于裸钢，轧制铁鳞的电位非常低。

表 2.3-99　浸没于海水里的碳素钢，其轧制铁鳞表面腐蚀与无铁鳞表面腐蚀的对照

地　区	经酸洗表面				轧 制 铁 鳞			
	腐 蚀 损 耗		最大蚀点深度		腐 蚀 损 耗		最大凹点深度	
	μm/a	mil/a	mm	mil	μm/a	mil/a	mm	mil
Halifax, Nova Scotia	120	4.8	1.9	75	110	4.3	1.7	68
Auckland, New Zealand	75	3.0	1.1	43	85	3.3	3.7	147
Plymouth, England	60	2.4	1.65	65	60	2.4	4.0	156
Colombo, Sri Lanka	90	3.6	1.6	64	100	3.9	6.1	240

氧浓度的影响。正是氧的阴极去极化效应使得大部分的腐蚀反应得以进行。在实际当中，也是由于防止氧进入金属表面的各种自然的遏制方式降低了腐蚀的速率，并常以此完全抑制腐蚀。

要说明的一种情况，就是对一些深海环境的参数，即氧的浓度、盐浓度、温度及 pH 值的影响已进行过调研。表 2.3-100 列出了其研究中得到的一些数据。钢的腐蚀速率可以作为所溶解含氧量的线性函数求得。

表 2.3-100　碳素钢的近表海面和深海腐蚀速率

浸 没 深 度		温度/℃	氧浓度/ppm	浸没时间/天	腐 蚀 速 率	
m	ft				μm/a	mil/a
近表海面①						
—	—	5～30	5～10	365	130	5.0
深海区域②						
715	2340	7.2	0.6	197	43	1.7
1615	5300	2.5	1.8	1604	23	0.9
1720	5640	2.8	1.2	123	50	2.0
		2.3	2.1	751	20	0.8
2065	6780	2.7	1.7	403	58	2.3

①Wrightsville Beach, NC 北卡罗来纳州，莱茨维尔海滨。　②Pacific Ocean(太平洋)。

电化腐蚀

海水里的电化腐蚀是一件必须给予重视的事情，因为腐蚀介质具有相当高的电导率。表 2.3-101 所示是按实际情况而排的各种金属在海水里电化的序列关系。由于溶液的成分、溶质的浓度、搅动、透气性、温度、金属的纯度、腐蚀物的形成以及生物生长所造成的使用条件上的千差万别，上述每一种因素都能形成一种不同的电势序。

表 2.3-101　海水中的电势序

1. 镁(最活跃)
2. 镁合金
3. 锌
4. 铝 100

(续)

5. 镉
6. 铝 2017
7. 钢(普通)
8. 铸铁
9. 铬铁(活跃)
10. 镍铸铁
11. 304 不锈钢(活跃)
12. 316 不锈钢(活跃)
13. 耐盐酸镍基合金 C
14. 铅-锡焊料
15. 铅
16. 锡

（续）

17. 镍(活跃)
18. 铬镍铁合金(活跃)
19. 耐盐酸镍基合金 B
20. 黄铜
21. 铜
22. 青铜
23. 铜-镍合金
24. 钛
25. 蒙乃尔高强度耐腐蚀镍铜(锰铁)合金
26. 银软钎焊料
27. 镍(惰态)
28. 铬镍铁合金(惰态)
29. 铬铁(惰态)
30. 304 不锈钢(惰态)
31. 316 不锈钢(惰态)
32. 银
33. 石墨(最不活跃)

海水中的碱性腐蚀速率

常有报告称，碳素钢和许多低合金钢若完全浸没在海水里，其短期腐蚀速率约为 130μm/a(5mil/a)，其长期腐蚀速率(5 至 10 年的浸没之后)会有所降低。

一般认为炼钢工艺不会影响海水里的腐蚀性，而且沸腾钢和镇静钢在腐蚀特性上也没有明显的差别。同样的，无论是加入少量的铜还是铬的合金，对于腐蚀也没有任何影响。例如，一项研究称，七种不同的平炉钢、六种含铜钢和其他若干种含低铬铜钢都浸没在海水里达 203 天，它们的腐蚀速率的相对差别范围仅为 135 ~ 150μm/a(5.4 ~ 5.8mil/a)。

速度的影响。海水的速度增加一般会提高腐蚀速率。例如有研究表明，将碳素钢和含铜钢一起浸没于滞流的海水里长达 5 ~ 10 年，它们的腐蚀速率是一样的——约为 70μm/a(2.8mil/a)。在低速流动的海水里碳素钢的腐蚀速率约为 95μm/a(3.8mil/a)，但是在较高速流动的海水里，其腐蚀速率为 380μm/a (15mil/a)。而含铜钢在高速海水里的腐蚀速率只约有 120μm/a(5.5mil/a)，这说明含有少量铜的合金可能有好处。大部分研究人员认为，速度对于腐蚀的影响就是一种侵蚀效应，由于腐蚀的生成物在其形成时被不断地从表面带走，因此降低了它们阻止进一步腐蚀的作用。

点蚀。在那些需要着重考虑点蚀的用途里，可以使用含量(质量分数)高达 3% Ni 或 3% Cr 的钢。镍钢和铬钢的点蚀速率都只有大约碳素钢的一半。例如在一种六年的浸没试验里，w(Cr)为 2% 的钢的点蚀平均深度约为 2mm(80mil)，相比之下碳素钢的为 5mm (200mil)。w(Cr)增加到 3% 以上就会改变腐蚀的模式，使其成为越来越多的深度更深的局部点蚀。例如 3% Cr 钢显示的是 0.2mm/a(8mil/a)的点蚀速率，13% Cr 钢的为 0.9mm/a(37mil/a)，17% Cr 钢的为 1.75mm/a(69mil/a)。

热带水里的腐蚀。热带气候里的海水温度高于温带或极地气候里的海水温度，由此造成较高的腐蚀速率。表 2.3-102 所示是在热带气候的淡水和海水里所进行的一个系统性研究的结果，在这种气候里就像在较为温和的气候里一样，无论在淡水还是在盐水里，碳素钢和 HSLA 钢的平均腐蚀速率都随时间而降低。而且，对于碳素钢和含铜钢，20 个最深的点蚀平均深度值几乎相等；而 Ni 钢经过海水的长期浸没，其腐蚀速率比较高，5% Cr 钢经过海水长期浸没，则稍低一些。除了表 2.3-102 种所列的结果外，还有一种 3% Cr 钢和几种含有 Ni、Cr、P、Cu 和 Si 不同含量的 HSLA 钢，在同样的条件下进行试验得到与表 2.3-102 中的相似钢几乎一样的结果。

表 2.3-102　热带水中典型的腐蚀速率

材　料	平均刺深率						20 个最深点蚀的平均深度变化					
	1 年		8 年		16 年		1 年		8 年		16 年	
	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a
淡水[①]												
碳素钢[②]	195	7.7	65	2.58	45	1.75	510	20	1470	58	1830	72
0.30 Cu 钢	200	7.9	75	2.9	45	1.8	560	22	1630	64	1630	64

（续）

材　料	平均刺深率						20个最深点蚀的平均深度变化					
	1年		8年		16年		1年		8年		16年	
	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a
海水③												
碳素钢②	150	5.9	80	3.2	75	2.9	1040	41	1680	66	2290	90
0.3Cu钢	150	5.9	90	3.5	80	3.1	915	36	1600	63	160	85
2Ni钢	190	7.4	100	4	85	3.3	840	33	2390	94	④	④
5Ni钢	160	6.3	100	4	85	3.3	735	29	2970	117	④	④
5Cr钢	70	2.7	100	4	85	3.5	685	27	1600	63	1750	69

①Gatun湖。　②酸洗。　③太平洋，近巴拿马Canal区。　④试件被腐蚀穿透。

防护措施

结合阴极保护再使用有机涂层是防止海水腐蚀的最为经济和最为有效的办法。海上钻井平台、管道及其他的水下设备都采用这种相结合的办法。涂层越致密，阴极保护需要的电流越小，其系统也就更为经济。具有较高的电流效率的铝阳极也是海水里最为常用的。然而锌阳极已在海水的用途里得到了广泛应用，而镁阳极就使用得不是太广。比碳素钢多一些优点的低合金钢，却常在最后的腐蚀防护的经济性分析中落选。

防腐剂有时要在海水冷却设备中使用。所有与海水接触的设备都应该在设计中尽可能避免电耦合的出现。

钢的应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂（SCC）是工程材料中的一种缓慢的、由环境诱发的裂纹扩展，它是通过机械应力与腐蚀反应的相互作用造成的。一般来说，低强度钢有是暴露在少数几种特殊环境里才对SCC敏感，例如在蒸汽锅炉里遇到的热苛性溶液、热硝酸盐溶液、无水氨以及热碳酸盐-碳酸氢盐溶液。

对于屈服强度大于690MPa（100ksi）的钢——如经调质的合金钢、热变形加工模具钢、马氏体时效钢以及马氏体的、可析出硬化的不锈钢——而言，造成SCC的环境并不鲜见。在许多合金系统里，SCC和氢脆开裂这两种现象是不易区分的。在含有硫化物或其他氢注入剂的环境里，这也属于一种特殊情况。

主要应关注的环境因素是天然水——如雨水、海水及大气潮汽。其中任何一种都可被污染，由此明显增加了SCC的可能性。由硫化氢引起的污染尤为严重，因此，依据与一定深度的油井（称为酸性油井）里的盐水有关的高浓度硫化氢而设置的一个受力钢，在其环境中所能承受的而不会产生裂纹的屈服强度上限约为620MPa（90ksi）。

钢的腐蚀防护

腐蚀防护往往是在为一给定的用途选用碳素钢或合金钢的时候需要考虑的重点。腐蚀会造成零件尺寸（横截面）减小或出现点蚀，后者不仅会减小点蚀处的横截面，还会要使应力增大并产生裂纹，从而降低其承载能力。显然，任何能减少或防止腐蚀的措施，都将延长零件的寿命并提高其可靠性（表2.3-103）。

表2.3-103　碳素钢在不同的环境里防腐蚀指南

防护方法	大　气	土　壤	淡　水	海　水	蒸汽系统	酸及酸洗池
金属镀层：电镀、镀锌、热喷涂	镀锌非常有效，镀其他金属则同时用于装饰和防腐	不推荐	镀锌，用于饮用水	不推荐	不推荐	不推荐
油漆：化学处理、底漆和面漆	最为经济和有效的腐蚀防护	很少用	相当有效	用于特殊油漆系统	不推荐	不推荐

（续）

防护方法	大气	土壤	淡水	海水	蒸汽系统	酸及酸洗池
阴极防护	不推荐	最为经济和有效的方法，特别与有机涂层而不是油漆合用	与有机涂层合用相当有效	非常有效	不推荐	在特殊条件下有效
抑制剂：液体和蒸汽	不推荐	不推荐	在某些用途中有效，特别是冷却水	在某些用途里相当有效	非常有效	非常有效
钢中添加合金	非常有效，特别是含铜钢和HSLA钢	无效	无效	仅对高合金含量有效	铬-钼钢非常有效	仅对高合金含量有效
从环境中除氧	不推荐	不推荐	很少使用	非常有效，特别在淡化和热海水里	非常有效	不推荐
去除较为惰性的金属，消除电偶	通常无必要	相当有效	有效	有必要	可以用	无效
有机涂层而非油漆	偶尔代替油漆使用	与阴极防护合用有好处	与阴极防护合用相当有效	与阴极防护合用有好处	不推荐	已有使用

零件根据其整体经济性、环境条件、零件预定寿命所需要的防护程度、使用中发生意外失效造成的后果及外观的重要性等一些主要因素，来决定钢零件是否需要对其腐蚀进行防护以及所采用的防护方法是否最经济和最有效。腐蚀的防护可以通过以下几种方式实现：①在钢与腐蚀介质之间形成一种不会被渗透的屏障；②引入一种物质，其能抑制发生腐蚀的化学反应；③引发能抵消包含在腐蚀中的电化作用的另一种电化作用。

涂层

所能采用的镀层种类似乎是没有底的，其种类可以从简单地以涂油作为经济的、临时性的保护，一直到通过铜-镍-铬的多层电镀获得一种具有高度光泽的金属外观的高级防腐蚀层。为经济起见，在选择涂层以前就要确定所需要的保护程度。

临时性保护。通过给钢涂以矿物油、添加有抑制剂和成膜剂的溶剂、石油制品的乳化液涂层或水中加石蜡，作为临时性的保护，通常能有效地应用于仓储和运输里。使用这些涂层必须：①经过酸洗将轧制铁鳞除去；②按照一定的涂层顺序进行，而且不能期待它们能长期防腐。

清洗。清洗对于任何一种涂层工艺都是很重要的先决条件，所有的氧化皮都要经过酸洗或喷砂予以去除。氧化物除去之后或者当钢有临时性的涂层在表面时，还必须进行去油脂。可以用碱洗、蒸汽去油或乳化剂清洗等办法进行去油脂。

热浸涂工艺。这是一种特别适用于涂铝、铅、锌及其某些合金的涂层工艺。热浸涂就是将钢件浸入熔融的金属浴池里，其表面通常用熔化的助熔剂覆盖着。而镀锌(电镀)是靠电化原理保护钢，因为相对钢基金属锌呈阳极，故在大部分环境中它先被腐蚀。

电镀。在所有的钢镀层工艺中，电镀也许是最贵的。所以电沉积应用于有外观、可软钎焊性或某些其他方面要求的金属镀层。如果只需要腐蚀防护，那么许多的非金属涂层就能提供较好的保护，而且成本低廉。所有传统的电镀都能应用于钢。

热喷涂。它能在很大范围的腐蚀性环境里为钢提供长期有效的腐蚀防护。它们有多种工艺可供选用，包括金属丝火焰喷涂、粉末火焰喷涂和电弧喷涂。锌、铝和锌-铝合金都是用于热喷涂技术的最为普通的镀层材料。

化学覆层处理。如果除此之外不再涂敷其他防护的话，化学覆层仅能为钢提供柔和的腐蚀防护；但是如果再加用油漆，其防护性就变得更好了。磷化膜和铬酸盐化学覆层广泛作为底漆应用于未经镀层和镀锌的钢。

薄有机涂层(油漆)。它通常比任何其他镀层更多地用于腐蚀防护，因为相对其所能达到的防护程度，其成本是比较低的。一种好的油漆系统包括适当的清洗、化学覆层、底漆以及可与之兼容的面漆。各种不同涂层在应用中还要结合使用喷涂、浸涂、浇涂、辊涂或电泳涂漆。

抑制剂

抑制剂是一种化学物质或几种物质的结合，将其加入介质中能够防止或减少腐蚀的发生，而不会与介质中的成分发生明显的反应。抑制剂主要应用于酸洗溶液、酸性的使用介质、蒸汽系统和中性及接近中性的水溶液。抑制剂可以是有机或无机的化合物，通常都能溶解于水性介质中。抑制剂可加入化学转化处理槽和油漆的底漆中使用。有些气相抑制剂能用于封闭的气氛(例如,作为包装的用途中)。

第4章 铸 铁

本章内容由《ASM特种手册》，铸铁，1996，3～130页的内容精简而成。其他有关铸铁的内容还可参阅本手册(下册)第4篇第2章以及本章末所列的精选参考文献。

第1节 铸铁的冶金学基础

铸铁一词像钢一样代表铁合金的一大家族。铸铁基本上是 $w(C)$ 超过2%和 $w(Si)$ 为1%～3%的铁合金。通过碳与硅含量的变化、添加各种合金元素以及改变熔化、铸造和热处理的工艺，从而形成其很大范围里的性能变化。

有五种工业用的铸铁，即灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、致密型石墨铸铁和白口铸铁。除了白口铸铁外，所有的铸铁都有显微组织的共同之处，即存在于作为基体组织的铁素体、珠光体、贝氏体、回火马氏体及其混合体中的石墨相。这四种类型的石墨铸铁只是按照它们石墨相的形态所作的粗略分类。灰铸铁为片状石墨，球墨铸铁为团状或球形石墨，致密型石墨铸铁(也叫蠕墨铸铁)则介乎这两者之间，以及可锻铸铁具有不规则的球状或“爆米花形”石墨，它是在白口铸铁的回火过程中形成的。表2.4-1列出了工业分类与显微组织分类之间的相关性，以及普通铸铁所获得的最后工艺状态。

表2.4-1 按照工业命名、显微组织和断口分类的铸铁

工业代号	碳-富集相	基体①	断口	最终组织形成前处理
灰铸铁	层片状石墨	P	灰色	凝固
球墨铸铁	球形石墨	F、P、A	银灰	凝固或热处理
致密型石墨铸铁	致密型(蠕虫形)石墨	F、P	灰色	凝固
白口铸铁	Fe_3C	F、M	白色	凝固和热处理②
麻口铸铁	层状 $Cr+Fe_3C$	P	麻色	凝固
可锻铸铁	回火石墨	F、P	银灰	热处理
等温淬火球墨铸铁	球状石墨	At	银灰	热处理

①F，铁素体；P，珠光体；A，奥氏体；M，马氏体；At，等温淬火(贝氏体)。 ②白口铸铁通常不经热处理，除非应力消除和继续奥氏体转变。

白口铸铁的取名是因为其白色断口表面的特征，而在显微组织中没有任何石墨。取而代之的是其碳以碳化物的形式存在，主要类型为 Fe_3C 和 Cr_7C_3。常常还存在一些更为复杂的碳化物，如由加入3%～5% Ni(质量分数)、1.5%～2.5% Cr而得到的 $(Fe、Cr)_3C$ 和由加入11%～35% Cr而得到的 $(Cr、Fe)_7C_3$，或者一些由其他元素形成的碳化物。

铸铁还可以按非合金铸铁和合金铸铁进行分类。非合金铸铁主要是含有少量锰、磷和硫的铁-碳-硅合金。典型的非合金铸铁的成分范围如表2.4-2所示。与钢相比，图2.4-1所示是普通铸铁中碳和硅的含量范围。

表2.4-2 典型的常见非合金铸铁的成分范围

铸铁型号	化学成分(质量分数,%)				
	C	Si	Mn	P	S
灰铸铁	2.5～4.0	1.0～3.0	0.2～1.0	0.002～1.0	0.02～0.25
致密型石墨铸铁	2.5～4.0	1.0～3.0	0.2～1.0	0.01～0.1	0.01～0.03
球墨铸铁	3.0～4.0	1.8～2.8	0.1～1.0	0.01～0.1	0.01～0.03
白口铸铁	1.8～3.6	0.5～1.9	0.25～0.8	0.06～0.2	0.06～0.2
可锻铸铁	2.2～2.9	0.9～1.9	0.15～1.2	0.02～0.2	0.02～0.2

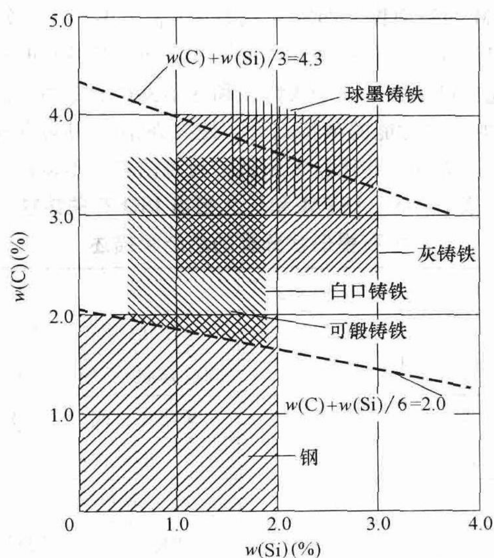


图 2.4-1 钢与不同铸铁的碳和硅的近似含量

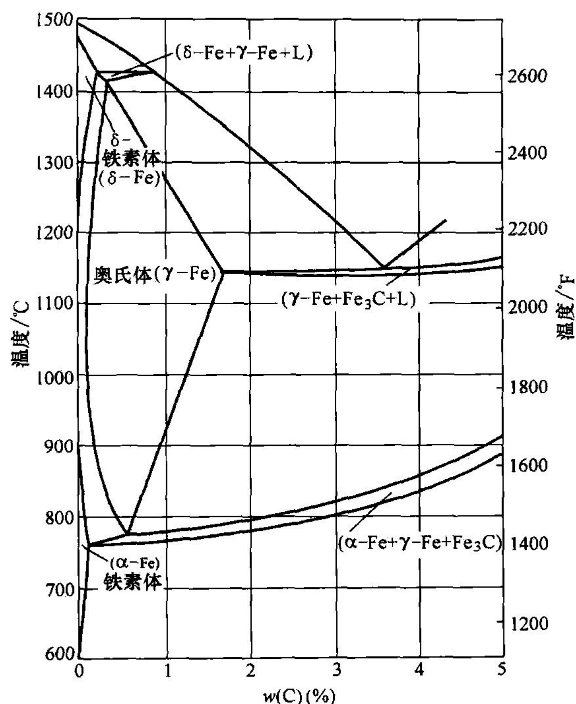


图 2.4-2 在 $Fe\text{-}Fe_3C\text{-}Si$ 三元图中 2%Si 的截面上的平衡图

铁-碳化铁-硅系统

通过在 $Fe\text{-}Fe_3C\text{-}Si$ 的三元相图中取一个 2% Si（接近许多铸铁的硅含量（质量分数））截面可以为讨论铸铁的冶金学问题提供一种便于利用的基准。图 2.4-2 代表了二元 $Fe\text{-}Fe_3C\text{-}Si$ 相图，但是在其特征上与三元系统还是有重要区别的。共晶和共析温度由 $Fe\text{-}Fe_3C$ 系统里的单一值变为 $Fe\text{-}Fe_3C\text{-}Si$ 系统里的温度范围，共晶和共析点也移至较低的含碳量上。

图 2.4-2 表示的是在铁与碳化铁（渗碳体）之间的亚稳态平衡，即一种亚稳态系统。其所含有的硅，无论是在铁素体还是在奥氏体中，都保持在铁的固溶体里，它不会影响碳化物相里的成分，只是在冷却过程中影响碳化物形成的条件及动力学机理。因此，在三元系统中，标号 α、γ 和 Fe_3C 代表产生于 $Fe\text{-}Fe_3C$ 二元系统里同样的相。会有一些硅随同碳一起析出，但无法将它们作为与碳不一样的相进行分辨。在亚稳态系统中的某些成分不会发生凝固，然而在稳态系统里，其生成物是铁和石墨而不是铁和碳化物。这些成分存在于灰铸铁、球墨铸铁和致密型石墨铸铁里。

如果利用三元图中 2% Si 的截面来追溯所发生的相变，那么其应用只能是基于假设硅浓度在所有部分及任何情况下均保持在 2% 的假设之下。严格地说，这显然是不符合实际的，不过，硅在铸铁中倒也不会发生明显的偏析。

碳平衡

碳和硅都会影响铸铁的性质，因此有必要大概估算它们对凝固的影响。这要通过建立碳平衡的概念 *CE* 来进行。应用这个方法，碳的平衡可用下式（式中数值为质量分数）计算：

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3}$$

或者更为精确地，可以将磷的因素也考虑进去：

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

通过将 *CE* 与 Fe-C 系统（4.3% C）中共晶成分的比较，可以看出在凝固过程中铸铁的表现是像亚共晶合金还是像过共晶合金。当 *CE* 接近共晶值时，液态可维持相对较低的温度，并在一个较小的温度范围里进行凝固。后者特征可以促使铸件内的性能均匀化。

在过共晶铸铁里（*CE* 大于约 4.3%），存在着一种集结石墨的倾向性——一种在铁液里形成并自由飘浮的先共晶石墨——在正常冷却条件下凝固析出。在亚共晶铸铁里（即 *CE* 较小），则存在着在凝固过程中形成白口铸铁和麻口铸铁的较大倾向。

铸铁特征

白口铸铁。溶解于铁液中的碳在凝固时并不形成石墨，而常以粗实的碳化物形式与铁结合在一起。白口铸铁硬而脆，并形成白色、晶体状的断口表面。

白口铸铁具有很高的抗压强度，高温下能很好地保持强度和硬度。但是最常用的是利用其优良的耐磨性和耐擦伤性能。这些性能主要是由于显微组织中粗实的碳化物。

灰铸铁。若成分及凝固时的冷却速度合适，可使相当部分的碳含量从铁液中分离出来成为片状石墨。当一块凝固的合金破裂，其破裂的路径是沿着石墨片而断开的，断口表面呈现为灰色是因为其明显的石墨外露。

灰铸铁有若干独特的性能，这些性能都源自于片状石墨在其显微组织中的存在。灰铸铁能易于进行切削加工，却不失能形成足够耐划伤的硬度。在边界润滑条件(即一种润滑剂的流动不足以维持全流体油膜的条件)下，它能防止被拉伤。它还具有适用于缓冲振动和缓和热冲击的突出性能。

球墨铸铁。球墨铸铁，即所谓塑性铸铁或团状石墨铸铁，其成分与灰铸铁非常相似，即在球墨铸铁的铸造过程中，促使石墨聚集成为球状颗粒或球晶而不成为片状。这是通过在一个称为球化的工艺阶段里，给铁液加入非常少量的且特定量的镁和/或铈来实现的。

球墨铸铁是用与生产灰铸铁同种类型的原材料进行生产的，但是通常要求的纯度稍高一些，特别是对于硫的控制。球墨铸铁的铸造性能(如流动性)可与灰铸铁类比。

相对灰铸铁，球墨铸铁的主要优点是其高强度与高塑性的相结合——对于抗拉强度为415MPa(60ksi)的铁素体，球墨铸铁具有高达18%的最小伸长率，而具有相应抗拉强度的灰铸铁只有0.6%的伸长率。具有抗拉强度约为830MPa(120ksi)的马氏体球墨铸铁至少还有2%的伸长率，而更新型的等温淬火球墨铸铁甚至具有更高的抗拉强度(1000MPa，或145ksi)却仍有超过5%的伸长率。

就大部分的用途而言，球墨的球形完整性控制在一定的偏差范围内所发生的性能下降是允许的。然而大部分的用途，对于类似片状和蟹形(表2.4-3)的石墨都是不允许的。

致密型石墨(CG)铸铁。也称蠕墨(蠕虫状)铸铁，其主要特征为在共晶组织内的石墨像灰铸铁里的片状石墨一样相互连接。与灰铸铁的石墨相比，CG中的石墨更粗糙、更圆形化，在金相图像里类似于ASTM的类型Ⅳ，即准片状石墨(表2.4-3)，其结构可以认为介于灰铸铁和球墨铸铁之间。其特有的一些性能也可认为是介于灰铸铁和球墨铸铁的之间，但是CG的这些性能的独特结合，使之在诸如制动盘和柴油机缸盖的一些用途里超越了灰铸铁和球墨铸铁。

表2.4-3 ASTM和与之相当ISO有关铸铁中石墨形状分类的总结和描述

ASTM型号①	相当ISO形式②	描述
Ⅰ	Ⅵ	团状(球状)石墨
Ⅱ	Ⅵ	团状(球状)石墨，不够完整
Ⅲ	Ⅳ	聚集体，或二次石墨
Ⅳ	Ⅲ	准片状石墨
Ⅴ	Ⅱ	蟹形石墨
Ⅵ	Ⅴ	不规则的“开”式球团
Ⅶ③	Ⅰ	片状石墨

①根据ASTM A247的规定。 ②根据ISO/R 945—1969(E)的规定。 ③再分成五种子类：均匀片，星花状聚集，叠片尺度，枝状、随机取向型和枝状、定向取向型。

致密型石墨铸铁可以用非常类似生产球墨铸铁的工艺中所用的方法，即通过非常严格地控制作为孕育剂镁的加入量来生产得到。其困难之处在于，若处理不足就变为灰铸铁的组织，而处理过分就变成了球墨铸铁组织，当镁的加入量误差超过50ppm时，就会发生上述情况。目前，CG的工业化生产用镁进行孕育时会产生50~600ppm的残留量，其中含有0.15%~0.5%(质量分数)的钛和10~150ppm的稀土元素如铈。事实上，这是一种利用一定量钛的存在对加入镁所引起的球化反应进行抑制的工艺，铈的加入则无需再为低浓度的硫进行控制。

可锻铸铁。它包含石墨的另一种叫做二次石墨的形态。石墨的这种形态是通过白口铸铁的热处理而得到的，后者并不含有石墨，但确实是含有高百分比的渗碳体。当白口铸铁长时间(约为60h)在960℃(1760℉)里加热时，渗碳体就会分解成为奥氏体和石墨。再从960℃(1760℉)缓慢冷却，根据其冷却速度及碳扩散率，奥氏体转变为铁素体或珠光体。可锻铸铁的塑性和韧性介于球墨铸铁和灰铸铁之间。因为生产白口铸铁的截面只能达到100mm(4in)左右厚，所以可锻铸铁的截面尺寸也就因此受到限制。近年来，可锻铸铁在许多用途里被处理上更为经济的球墨铸铁所替代。

精选参考文献

- *Casting*, Vol 15, *ASM Handbook*, ASM International, 1988.
- J.R. Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, ASM International, 1996.
- R. Elliot, *Cast Iron Technology*, Butterworths, 1988.
- H. Fredriksson and M Hillert, Ed., *The Physical Metallurgy of Cast Iron*, Proc. Materials Research Society, North Holland, 1985.
- B. Lux et al., Ed., *The Metallurgy of Cast Iron*, Georgi Publishing, 1975.
- I. Minkoff, *The Physical Metallurgy of Cast Iron*, John Wiley & Sons, 1983.
- *Properties and Selections: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 3–104.
- C.F. Walton and T.J. Opar, Ed., *Iron Castings Handbook*, Iron Castings Society, 1981.

第2节 灰 铸 铁

灰铸铁指的是一大类铁的铸造合金，其显微组织的特征为片状石墨，分布在铁质基体里。灰铸铁基本上属于铁-碳-硅合金，通常含(质量分数)2.5%~4% C、1%~3% Si，以及添加的锰，这取决于所要求的显微组织(如低至0.1% Mn的铁素体灰铸铁和高达1.2% Mn的珠光体灰铸铁)，还有少量的硫和磷成为杂质而存在。它还能生产更高合金含量(>4%)的奥氏体镍合金灰铸铁，以及应用于耐腐蚀和/或耐热的用途里的高硅含量的灰铸铁。本章第6节里将阐述这些材料。

灰铸铁的种类

在ASTM标准A48里，可以查到灰铸铁的一种简易而又传统的分类方法，它用单位为ksi的抗拉强度值对各种灰铸铁进行分类。这种ASTM分类法决不是意味着从等级20(最小抗拉强度为140MPa或20ksi)到等级60(最小抗拉强度为410MPa或60ksi)是等级逐级提高的划分。在许多用途里，强度并不是选择材料牌号的主要依据。例如像离合器盘和制动鼓的零件检验，其耐热性是十分重要的，低强度牌号铁的这种性能更加优良。同样的，在如钢锭或生铁的铸模的热冲击应用中，等级60的铸铁将很快失效而等级25的铸铁却能表现出很好的性能。对于机床和其他承受震动的零件，具有减震能力的低强度铸铁往往有其优势。

一般可以认为从等级20~60，下列灰铸铁的性能会随其抗拉强度的提高而提高：

- 所有的各种强度，包括高温下；
- 通过切削达到低表面粗糙度的能力；
- 弹性模量；
- 耐磨性。

另一方面，下列性能将随其强度的提高而降低。因此当这些性能非常重要时，低强度铸铁的使用效果优于高强度的。

- 易切削性；
- 抗热冲击性；
- 减震能力；
- 铸成薄壁截面的能力。

成分。灰铸铁中的主要元素为碳、硅和铁。对于工业用铸铁，碳和硅可以在很大的范围里变化：

铸铁型号	总含碳量（质量分数，%）	含硅量（质量分数，%）
等级20	3.40~3.60	2.30~2.50
等级30	3.10~3.30	2.10~2.30
等级40	2.95~3.15	1.70~2.00
等级50	2.70~3.00	1.70~2.00
等级60	2.50~2.85	1.90~2.10

铸造性

能否成功地生产灰铸铁的铸件取决于铁液的流动性和冷却速度，而这些因素又受最小截面厚度和截面厚度的变化所影响。如下所述，铸件设计常用截面敏感度表述。这就需要尽可能把铸件关键截面上的性能同其成分与冷却速度的综合效应进行关联。所有这些因素都是相互有关的，可归结于一个术语“铸造性”，对于灰铸铁可定义为：在与浇铸的铁液种类相适应的具有一定体积/面积比和力学性能一个型腔中能够生产得到的最小铸件截面厚度。

流动性。由于浇铸不足、流动不连续和弯角形成的废品损耗，归根到底都是由于浇注的铁液流动性不足所致。

如果铸型的状况、浇注速度及其他工艺变量都一致，则工业用灰铸铁的流动性主要取决于超过凝固点(液相线)以上的过热温度度数。液相线温度随总含碳量(TC)的减少而升高，因此在同样的温度下浇注，其流动性也就会下降。流动性一般是按照液体在金属螺旋形的流动性试验模中流经的长度进行测量的。图2.4-3和表2.4-4所示是不同含碳量的非合金灰铸铁的流动性与过热温度之间的关系。

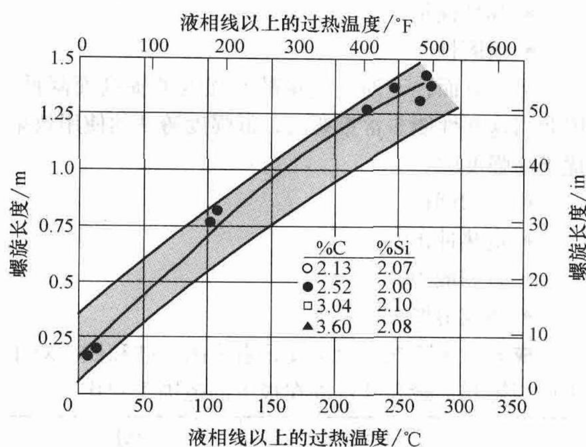


图2.4-3　四种不同含碳量的非合金灰铸铁的流动性与过热温度之间的关系

表2.4-4　浇铸温度为1455℃(2650℉)的2%Si不同含碳量的灰铸铁的过热温度

w(C)(%)	液相线温度		液相线以上的过热温度	
	℃	℉	℃	℉
2.52	1295	2360	160	290
3.04	1245	2270	210	380
3.60	1175	2150	280	500

显微组织

灰铸铁的显微组织一般是以珠光体为主的基体组织，其上全部都分散着石墨片(见图2.4-4)。通过改变铸造工艺可使石墨片按一定的模式成核和生长，以此增强所要求的性能。石墨的数量、大小和分布是很重要的。太快的冷却速度将促使生成“麻口铸铁”，这时碳同时以原始渗碳体(碳化铁)和石墨的形式存在。含高百分比硅和碳的铸铁经过非常缓慢的冷却，有可能产生以铁素体为主的基体并带有粗大石墨片。

石墨形貌。灰铸铁的力学性能和物理性能部分地受制于石墨片的形状、大小、数量及其分布。ASTM A247规定了一种评价石墨片的分布与大小的方法。从A到E(见图2.4-5)有五种石墨片的分布类型。

类型A在整个铁质基体里石墨片的分布和方向都是随机的(见图2.4-4)。这种类型的石墨是在凝固过冷量为最小的铸铁里见到的，如果力学性能还需要优化，则类型A是所要求的组织。

类型B的石墨(星花形)形成于接近共晶成分的铸铁里，这种铸铁的凝固过冷量比类型A石墨的要大。类型B石墨片是在厚薄适度的截面(大约10mm



图2.4-4　等级30的灰铸铁。组织为珠光体的基体里的A型石墨

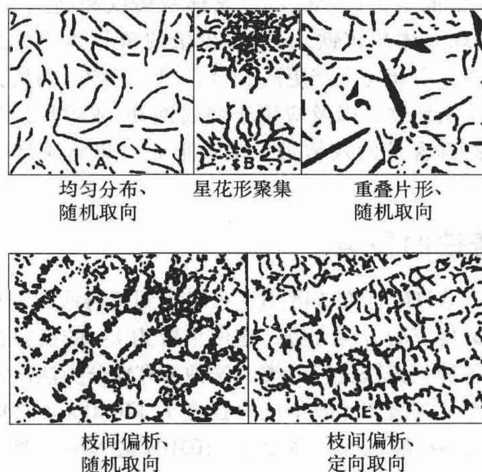


图2.4-5　ASTM A247规定的石墨分布

或⅜in)里，并沿其较厚的截面表面上所常见的一种情形。

类型D和E的石墨是在高过冷量时形成的，但还不足以生成碳化物。这两种类型都可在晶枝间的区域发现。类型D石墨片呈随机分布，类型E石墨片则有取向性。抛光平面与石墨片的相交方式也许是引起这种取向上差异的缘故。钛和铝会促成过冷石墨组织。与过冷石墨有关的铁基体通常为铁素体，因为细的多枝状石墨片将缩短碳的扩散距离并形成低碳基体。由于铁素体的抗拉强度低于珠光体的，故铸铁的

预期强度也低。

类型C石墨生成在过共晶铸铁里，尤其是高含碳量的铸铁里。类型C石墨在铸铁的初始凝结过程中析出。通常所谓的集结石墨呈现为一些直形、粗糙的板条。它大大地降低了铸铁的力学性能，而且切削加工后出现粗糙的表面粗糙度。然而类型C石墨倒是要求高热传递的用途所需要的。

石墨片的大小也会影响性能。大石墨片与高CE值和低冷却速度的铸铁有关。强亚共晶铸铁和经受快速凝固的铸铁常呈现小而短的石墨片。大石墨片是要求高热传导和减震能力的用途所需要的，而小石墨片由于对基体的破坏程度较小，而适用于要求有最高拉伸性能和较低表面粗糙度的用途。

截面敏感性

实际上任何一种可以浇铸的灰铸铁的最小截面厚度对截面的冷却速度的依赖性可能超过它对金属流动性的依赖性。例如，可以分别用等级50和等级25的铸铁浇铸300mm(12in)见方且厚度为6mm(0.25in)铸铁板，但用等级50浇铸出来的将不是灰铸铁，因为其冷却速度太快以致里面生成的是粗大的碳化物。然而采用等级50铸铁制造柴油机的缸盖是完全合理的，在其点火平台上面的水套里有主要为6mm(0.2in)的截面壁厚。这就是因为缸盖的冷却速度会由于其“容积效应”而减缓，而这种效应是由其封闭式的型芯以及6mm(0.25in)壁厚之间的邻近距离(常小于12mm,或0.50in)所造成的。

应该认识到作为最小截面的也可能是不含有粗大碳化物的灰铸铁，不过这不但与金属的成分有关，还取决于铸造工艺。例如对于基本成分一定的灰铸铁，铸造人员可以通过调整硅含量或将孕育剂(石墨化剂)加入铁液包里(或者更有效的办法是当铁液浇入铸型时直接加入铁液流)来减小最小截面尺寸，以此防止碳化物的形成。

截面尺寸的典型效应。用砂模铸造锥度为10°的楔形板条，再沿其长度方向从接近中心的位置剖开，然后在剖面上从薄到厚逐点测试洛氏硬度，最后从由此画出的曲线中可看出截面的逐渐增大对于硬度所造成的影响，见图2.4-6。

在图2.4-6中，金相组分沿曲线从左边开始发生以下的逐渐变化，楔形板条的顶尖处为白口铸铁(碳化物和珠光体的混合物)且硬度超过50HRC，接着铸铁变成麻口铸铁(白口铸铁和灰铸铁的混合物)且硬度急剧下降。由于细的类型D片状石墨的出现而使硬度达最低值，其组织中通常含有大量的铁素

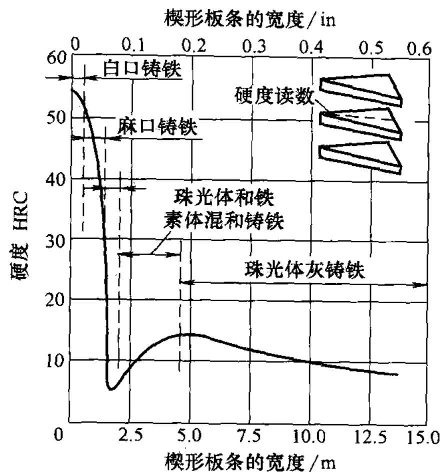


图2.4-6 截面厚度和组织的影响。如插图所示，沿离铸铁楔条的顶端距离的增加而逐点测试硬度。铸铁的成分(质量分数)为3.52%C、2.55%Si、1.01%Mn、0.215%P和0.086%S

体。随着冷却速度略有降低，其组织转变成珠光体基体中的类型A的片状石墨，硬度又提高到曲线上的另一最大值，通常这种组织最能满足抗冲击和强度的需要。超过该点，随着截面厚度的增加，石墨片变得较为粗糙且珠光体薄片的间隔也较宽，以致硬度稍有下降。最后楔形板条的厚度进一步增加而冷却速度降低，珠光体逐渐分解成为铁素体和石墨的混合物，于是铸铁也就更软、更弱。

大部分的工业用灰铸铁的组织可由图2.4-6右边下斜部分的曲线所代表，而且楔形板条厚度超过5mm(0.20in)，其硬度和强度的逐渐降低也反映其截面尺寸的不断增加。然而，薄截面也可以用图中左边下斜部分的曲线表示。

图2.4-7所示是几种等级的铸铁的不同截面尺寸对抗拉强度的影响。对于所有的灰铸铁，抗拉强度都是随截面的尺寸增加而降低。例如，一种截面为25mm(1in)、抗拉强度为310MPa(45ksi)的铸铁，可以因为截面变大而导致冷却速度的降低，从而成为截面为75mm(3in)、抗拉强度为207MPa(30ksi)。抗拉强度的这种降低是由较大的石墨片和化合碳的减少所造成的。化合碳的减少导致观察到的铁素体增加，这时珠光体间隔变粗或出现铁素体相。

等级20铸铁达到最高强度时的截面尺寸小于等级60的。每一种等级都有其最小截面尺寸，这也就是一个没有碳化物生成的截面尺寸。表2.4-5所示就是各种非合金灰铸铁所推荐的最小截面尺寸。对于铸造人员和设计人员来说，重要的是要认识到，每一种

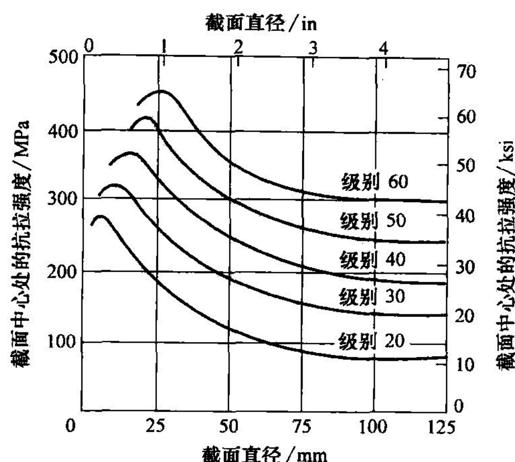


图 2.4-7　五种级别的灰铸铁的铸造样品的截面尺寸对抗拉强度的影响

等级的铸铁都有一最小截面尺寸，以此尺寸进行铸造时不需要使用冷铁，并且这个最小尺寸随灰铸铁等级的提高而增加。

表 2.4-5　非合金灰铸铁的最小推荐截面尺寸

等级	最小截面厚度		体积与表面积之比①	
	mm	in	mm	in
20	3.2	⅛	1.5	0.06
25	6.4	¼	3.0	0.12
30	9.5	⅜	4.3	0.17
35	9.5	⅜	4.3	0.17
40	15.9	⅝	7.1	0.28
50	19.0	¾	8.4	0.33
60	25.4	1	10.7	0.42

①体积与表面积之比适用于方形板材。

常用截面

虽然 ASTM 尺寸 B 试棒对所有从等级 20 到等级 60 的灰铸铁都是最常用的，但是 ASTM A48 还是提供了一系列的试棒尺寸，让使用者能选用最为接近铸件关键截面上冷却速度的试棒尺寸。在实际中，对于各种 ASTM 等级的铸铁，所推荐的常用铸件截面的最小值(表 2.4-5)通常都比较能予以确信。这些常用截面不应该有碳化物区域。在一个板形的截面里偶尔有更薄的壁厚(如筋板)也不要紧，除非它们非常的薄或延伸到铸件的外沿。

图 2.4-8 所示是等级 30 和等级 50 灰铸铁在不同截面上的力学性能。在等级 30 铸铁的一个 10mm (0.4in)当量板料的截面里，化合碳含量和硬度还在一个安全的水平上，其体积与表面积之比(*V/T*)(原文如此,*V/T* 似为 *V/A* 之误——译者注)大约为 5mm (0.20in)。而等级 50 铸铁如果当量板料的截面减小到大约 15mm(0.6in)且 *V/A* 约为 7mm(0.27in)时，其化合碳和布氏硬度(HB)均显示出明显的增加。这些结果均与表 2.4-5 中的推荐值相符合。

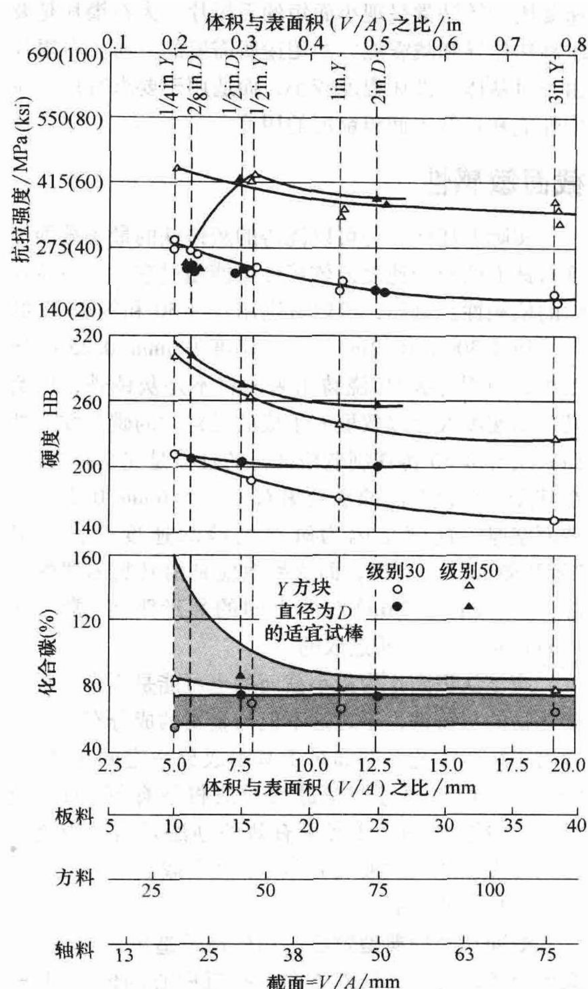


图 2.4-8　作为截面尺寸函数的等级 30 和等级 50 灰铸铁的力学性能。等级 30 铸铁成分(质量分数)：3.40% C、2.38% Si、0.71% Mn 、0.423% P 和 0.152% S，等级 50 铸铁成分(质量分数)：2.96% C、1.63% Si、1.05% Mn、0.67% Mo、0.114% P 和 0.072% S。

浇铸某一等级的灰铸铁，若其板料的截面小于所推荐的截面尺寸，那么当铸件进行切削加工时会产生危害。对于常用 9.5mm(⅜in)的截面，一般由于强度过高而造成的损耗为：

等 级	不合格率(%)
35	忽略不计
45	25
55	80~100

其不合格在于铸件里存在一些“硬点”以致无法以通常所用的加工方法对其进行切削。

在一些个别的用途里，如果能合理放置一些出气孔和冒口以使铸件经受缓慢冷却(相当增加截面厚度)，那么有时就可以应用更高等级的铸铁。

试棒的性能

有时从试棒获得的力学性能数值只能作为所生产的铸件金属的真实力学性能的参考。当试棒和铸件用同一铁液浇铸，随后又经历几乎一样的热态加工，这样的试棒强度可以一般性地代表铸件金属的强度。然而由于铸件的不同截面尺寸和不同冷却速度，故不能认为试棒的试验数据能准确地代表所有铸件的各个截面上的金属性能。

常规试验。专为试验所浇铸的试棒的拉伸和横向加载试验是评价灰铸铁强度最为通用的方法。

在标准拉伸试验中，很少测试灰铸铁的屈服强度、伸长率和断面收缩率。横向加载试验则用于测试其抗弯强度，它的另一个优点就是易于取得缺陷值。表2.4-6列出了其技术规范最小值。横向加载试验通常比拉伸试验更快地获得试验数据，因为横向加载试验没有必要使用经过切削加工的试件。试件的表面状况会影响横向加载试验，但不如对拉伸试验的影响大。相反，在对截面非常敏感的铸铁里会形成粗大石墨并存在于试棒的心部，这些石墨将影响拉伸试验而不是横向加载试验。

表2.4-6 按ASTM A438试验灰铸铁的横向断裂载荷

ASTM 等级①	近似抗拉强度		经修正横向断裂载荷①					
			A试棒②		B试棒③		C试棒④	
	MPa	ksi	kN	lbf	kN	lbf	kN	lbf
20	138	20	4.00	900	8.01	1800	26.69	6000
25	172	25	4.56	1025	8.90	2000	30.25	6800
30	207	30	5.12	1150	9.79	2200	33.81	7600
35	241	35	5.67	1275	10.68	2400	36.92	8300
40	276	40	6.23	1400	11.57	2600	40.48	9100
45	310	45	6.85	1540	12.46	2800	43.15	9700
50	345	50	7.45	1675	13.34	3000	48.04	10300
60	414	60	8.56	1925	15.12	3400	55.60	12500

①按照ASTM A48、ASTM A278、FED QQ-1-652或其他规定以ASTM A438为其试验方法的技术规范。包括仅由生产方和买方双方达成的协议所规定的技术规范。 ②直径22.4mm(0.88in)，支点间距为305mm(12in)。 ③直径30.5mm(1.20in)，支点间距为457mm(18in)。 ④直径50.8mm(2.00in)，支点间距为610mm(24in)。

通用技术规范。ASTM A48是采用试棒的通用技术规范。实际上，分别铸成的三种不同标准尺寸试棒中的任何一种，都可在控制铸件截面时用于评价其性能。在制造商与用户就铸件截面的控制达成协议之后，与该截面上预期冷却速度基本相适应的试棒尺寸也就书面规定了(表2.4-7)。

用于一般性工程用途的大部分灰铸铁都为等级25、等级30和等级35。A48完全建立在力学性能的基础之上，并且由各生产商自行选择能满足性能要求的化学成分。主要生产等级35铸铁的中档尺寸截面铸件的制造商将会发现，大型截面的铸件要求用

表2.4-7 与控制铸件截面相适应的试棒设计(ASTM A48)

控制截面		试验棒	试验棒铸造直径	
in	mm		mm	in
<0.25	<6	S	①	①
0.25~0.50	6~12	A	22.4	0.88
0.51~1.00	13~25	B	30.5	1.20
1.01~2.00	26~50	C	50.8	2.00
>2.00	>50	S	①	①

①试棒的所有尺寸均由制造商与买方协商确定。

50mm(2in)的试棒进行验证，但是用相同的化学成分无法达到验证等级35铸铁的要求。这种试棒只能用于验证低等级(如等级25或等级30)的铸铁。随着所控制截面厚度的增加，必须将成分调整至同样的抗拉强度。

ASTM技术规范除了A48以外，还包括A159(汽车)、A126(阀、法兰和管件)、A74(污水管及接头)、A278(温度高达340℃或650℉的压力零件)、A319(高温、非压力零件)、A823(金属铸模用灰铸铁)和A436(用于热、腐蚀和要求抗磨条件下的奥氏体灰铸铁)。用于汽车的灰铸铁也遵循SAE标准J431的规定。

抗压强度。当灰铸铁用于结构用途(如机器的机身或支架)时，工程师通常设计成仅使其承受重量，并且按照材料的抗压强度进行计算。表2.4-8列出了高抗压极限的灰铸铁，表中概括了各种牌号的一般力学性能数值。如果所承受的不是静态重量(除非这些载荷是恒定的)，那么就成为一个动态应力的问题，本节后面要对其进行讨论。

表2.4-8 标准灰铸铁试棒铸造后的一般力学性能

ASTM A 48，等级	抗拉强度		抗扭剪切强度		抗压强度		交变弯曲疲劳极限		试棒B横加载		硬度 HB
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	kN	lbf	
20	152	22	179	26	572	83	69	10	8.23	1850	156
25	179	26	220	32	669	97	79	11.5	9.67	2175	174
30	214	31	276	40	752	109	97	14	11.23	2525	210
35	252	36.5	334	48.5	855	124	110	16	12.68	2850	212
40	293	42.5	393	57	965	140	128	18.5	14.12	3175	235
50	362	52.5	503	73	1130	164	148	21.5	16.01	3600	262
60	431	62.5	610	88.5	1293	187.5	169	24.5	16.46	3700	302

抗拉强度。为直接承受静态拉伸和弯曲的零件选用灰铸铁时，必须考虑其抗拉强度。这种零件包括压力容器、高压釜、箱体以及其他机壳、阀、管接头和杠杆。根据加载的不确定性，在图示的许用设计应力里应采用2~12的安全系数。表2.4-6和表2.4-8中给出了典型的抗拉强度值(原文为valves,疑为values之误——译者注)。

横向加载强度和挠度。将一根可调节加载支点的试棒作为简支梁进行加载，并且测出直至其发生断裂时的载荷和挠度，然后用标准梁的公式将结果转换成强度的名义指数。如此得出的数值被命名为“折断模数”。折断模数值对于生产控制是颇为有用的，但未经进一步的分析和诠释是不能用于铸件设计的。表2.4-6和表2.4-8给出了灰铸铁的典型横向折断载荷。

灰铸铁的断裂伸长率。其值非常小(数量级只有0.6%)，故很少作为技术参数报告。设计人员也不能以任何定量的方式使用永久性的伸长率数值。

抗扭剪切强度。如表2.4-8所示，大部分的灰铸铁都有很高的抗扭剪切强度，而且它的许多牌号的抗扭强度还超过某些牌号的钢。这种特性及其对缺口的低敏感性，使得灰铸铁成为一些不同类型轴的合适材料，尤其是一些具有较高抗拉强度的灰铸铁牌号。

弹性模量。图2.4-9所示是典型的灰铸铁应力-应变曲线。灰铸铁不遵循胡克定律，拉伸模量通常按照从原点到应力-应变曲线上相当于1/4抗拉强度的那一点连线的斜率(割线模量)来确定。也有些工程师将应力-应变曲线靠近原点处的斜率(切线模量)作为弹性模量使用。

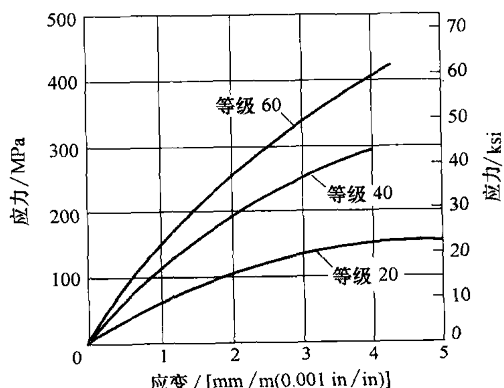


图2.4-9 三种等级灰铸铁在拉伸时的典型应力-应变曲线

硬度。灰铸铁的硬度是用布氏硬度或洛氏硬度计进行测试的，其数值介于铸铁中软石墨与硬金属基体的两者硬度之间。即使金属基体的硬度不变，石墨大

小及其分布上差别也会造成其硬度在很大范围里的变化(特别是洛氏硬度)。为说明这种影响，表2.4-9示出了五种经过硬化的铸铁基体的显微硬度测值，并与同样铸铁的洛氏C硬度值进行比较。

表2.4-9　石墨类型分布对经硬化的灰铸铁硬度的影响

石墨的类型	总含碳量	常规硬度 HRC①	基体硬度 HRC②
A	3.06	45.2③	61.5
A	3.53	43.1	61.0
A	4.00	32.0	62.0
D	3.30	54.0	62.5
D	3.60	48.7	60.5

①用常规洛氏C硬度测试。　②基体硬度，用表面硬度计测试并换算到洛氏C硬度。　③虽然这是用所指定的测试方法测得的数值，但它并不是典型的3.06%C灰铸铁。通常这类铸铁的硬度为48～50HRC。

如果要想建立任何硬度的换算关系，那么所比较的铸铁中的石墨类型和数量必须保持不变。洛氏硬度只适用于经硬化的铸件(如凸轮轴)，但是即使是经硬化的铸件，布氏硬度也是首选可用。若要建立未经硬化铸件的任何强度关系，则必须使用布氏硬度。

交变弯曲的疲劳极限

因为测定疲劳极限是很昂贵的，故设计者通常只能有其不完全的资料。图2.4-10所示是在室温下灰铸铁在完成全部循环周数的交变弯曲应力后所得到的疲劳寿命曲线。其上每一点都代表一个试件的数据。表2.4-8列出了更多的数据。

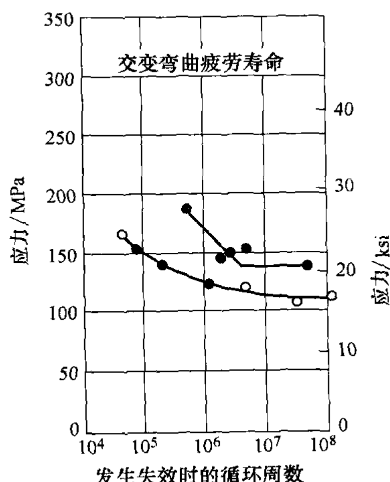


图2.4-10　成分(质量分数)为2.84%C、1.52%Si、1.05%Mn、0.07%P、0.12%S、0.31%Cr、0.20%Ni和0.37%Cu的铸铁在室温下的交变弯曲疲劳寿命。空心圆圈代表缺口试件，实心圆圈代表无缺口试件。

在铸铁零件的设计中常会碰到轴向循环载荷或扭曲循环载荷的例子，但是很多情况都不是完全的交变载荷。作为一种能规则地重复变化的应力通常能表示成一个平均应力和一个应力范围的函数。只要有可能，设计者就应当从有限的可用资料里选用符合实际的数据。

如果没有精确的有效数据可供利用，那么经过加工的零件的交变弯曲疲劳极限可以估计成为该特定灰铸铁牌号的最小规定抗拉强度的大约35%。这个数值可能比灰铸铁已有的疲劳极限数据平均值较为保守。

精选参考文献

- C.E. Bates, Alloy Element Effects on Gray Iron Properties, *Trans. AFS*, Vol 94, 1986, p 889–912.
- D.B. Craig, M.J. Hornung, and T.K. McCluhan, Gray Irons, *Castings*, Vol 15, *ASM Handbook* (formerly 9th ed., *Metals Handbook*), ASM International, 1988, p 629–646.
- Elevated-Temperature Properties of Cast Irons, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 409–427.
- R.B. Gundlach, The Effects of Alloying Elements on the Elevated Temperature Properties of Gray Irons, *Trans. AFS*, Vol 91, 1983, p 389–422.
- D.E. Krause, Gray Iron—A Unique Engineering Material, *Gray, Ductile, and Malleable Iron Castings—Current Capabilities*, STP 455, 1969, p 3–28.
- S. Lampman, Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons, *Fatigue and Fracture*, Volume 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 665–679.
- Mechanical Properties of Gray Iron, *Iron Castings Handbook*, C.F. Walton and T.J. Opar, Ed., Iron Castings Society, Inc., 1981, p 203–295.
- Metallurgy and Properties of Gray Irons, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 32–53.
- C.F. Walton, *Gray and Ductile Iron Castings Handbook*, Iron Founder's Society, 1971.
- C.V. White, Gray Irons, *Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 12–32.

第3节　球墨铸铁

球墨铸铁(SG)。也称塑性铸铁或团状铸铁，这是一种石墨以微小的球(团)状(见图2.4-11)存在于铸铁里的铸铁。在球墨铸铁里，在凝固过程中，共晶石墨以类似于一种共晶石墨在灰铸铁里分离出来的方式从铁液里分离出来。然而，因为于浇铸前在铁液里加入的添加剂，石墨生长成球状而不是灰铸铁里的各种片状特征。含有球状石墨的铸铁会变得强得多，而且比灰铸铁或可锻铸铁有更高的塑性。球墨铸铁可以

认为是一种由球状石墨赋予其独特性能的天然复合材料。

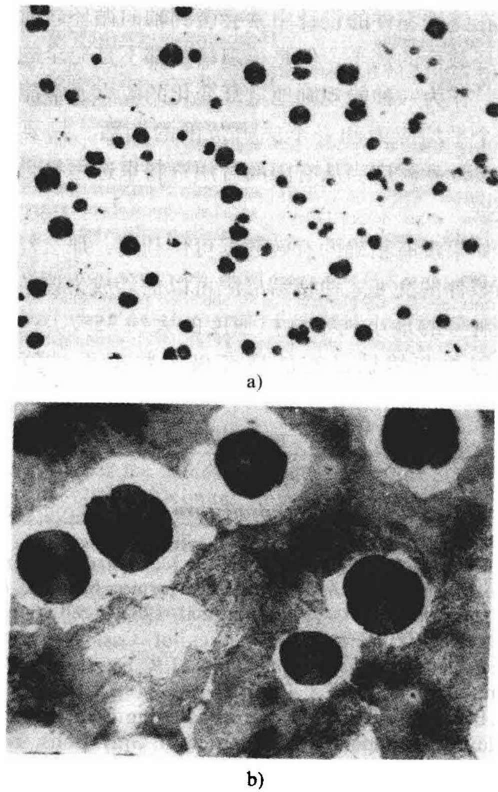


图2.4-11　球状石墨在未经腐蚀的球墨铸铁基体，75×(a)；及其在经腐蚀的条件下，300×(b)

相对较高的强度和韧性使球墨铸铁在许多的结构用途中具有灰铸铁和可锻铸铁所没有的优点。还有，由于球墨铸铁并不需要通过热处理生成石墨球(而可锻铸铁确实要生成二次石墨团粒)，尽管它要求一种熔化处理和孕育过程，但还是能与可锻铸铁相媲美。其熔化生产率通常也高于可锻铸铁。球墨铸铁可以用于制成X-射线的标样，因为其孔隙停留在热中心。可锻铸铁却无法容纳孔隙，因为其孔穴会像流束一样延续到热点的表面，并表现为裂纹。

球墨铸铁的一般性特征

一般来说，非合金的球墨铸铁的成分不同于灰铸铁或可锻铸铁(表2.4-10)。用于球墨铸铁的原料必须有更高的纯度。球墨铸铁像灰铸铁一样可以在冲天炉、电弧炉或感应炉里熔化。球墨铸铁作为一种液体既要有很高的流动性、优良的铸造性，又要有高表面张力。用于球墨铸铁的型砂和浇铸设备必须是具有高密度和良好热传递的坚固铸型。

表2.4-10　非合金铸铁的一般成分范围

种类		灰铸铁	可锻铸铁	球墨铸铁
化学成分(质量分数,%)	TC①	3.25~3.50	2.45~2.55	3.60~3.80
	Mn	0.50~0.90	0.35~0.55	0.15~1.00
	Si	1.80~2.30	1.40~1.50	1.80~2.80
	Cr	0.05~0.45	0.04~0.07	0.03~0.07
	Ni	0.05~0.20	0.05~0.30	0.05~0.20
	Mo	0.05~0.10	0.03~0.10	0.01~0.10
	Cu	0.15~0.40	0.03~0.40	0.15~1.00
	P	≤0.12	≤0.03	≤0.03
	S	≤0.15	0.05~0.07	≤0.002
	Ce	—	—	0.005~0.20②
	Mg	—	—	0.03~0.06

①TC，总含碳量。　②可选。

凝固和收缩特征。在凝固过程中，石墨的成形会伴随造成体积的增加，以此抵消在金属组分里因液相到固相而引起的体积减小。球墨铸铁铸件一般只需使用最小的冒口(作为铸型上的熔池可给型腔里注入熔化金属，以此补偿在冷却和凝固过程中的金属液体的收缩)。灰铸铁常不用冒口就可保证无收缩铸件。另一方面，钢和可锻铸铁一般要求很重的冒口补缩。所以球墨铸铁的熔化生产率(有用的铸件重量与所浇铸的金属重量之比)也大大高于铸钢件或可锻铸铁，但不如灰铸铁的高。某些情况下，浇铸球墨铸铁可以不用冒口。

设计者为了补偿铸铁的收缩(在凝固及其之后再冷却到室温的过程里)，要使模型做得比成品铸件要求的尺寸更大一些。一般来说，球墨铸铁所要求的补缩比任何其他铸铁金属都小。模型制作工所用的收缩裕量通常为：

铸造金属种类	球墨铸铁	灰铸铁	可锻铸铁	奥氏体合金铁	白口铸铁	碳钢	合金钢
收缩裕量(%)	0~0.7	1.0	1.0	1.3~1.5	2.0	2.0	2.5

以上所列的收缩裕量可以有所变化，由于凝固形式对于发生在不同方向上收缩量的影响，在一个铸件的不同方向上常必须使用不同的百分比。收缩是体积的，尺度与体积之比将影响各个尺度。当球墨铸铁接近发生收缩的条件时，石墨球就会趋向于被拉成直线，其结果便是降低疲劳强度。

铸造状态与热处理状态的比较。大部分的球墨铸铁都是以铸造状态使用，但是有些铸造厂，其铸件发运前要经过热处理。根据对性能所要求的效果而改变热处理工艺。除了等温淬火外，任何热处理都会降低其疲劳性能。保持在亚临界温度(705℃或1300℉)中不超过4h可提高抗断裂性。将铸件加热到790℃(1450℉)以上，然后快速冷却(油淬火或空气淬火)会明显地降低高于室温温度下的疲劳强度和抗断裂性。通过加热到900℃(1650℉)以上再缓慢冷却的铁素体化，也会产生同样的效果。加热到临界温度以上还能减少经调质处理的显微组织中的化合碳含量，并且形成的抗拉强度和耐磨性均比具有同样硬度的铸造状态的更低。有些铸件可以进行硬化处理(局部表面硬化或者整体硬化)，以此形成贝氏体或马氏体基体。

随着基体组织从铁素体、铁素体和珠光体、珠光体、贝氏体以至最后到马氏体的逐渐变化，其硬度、强度和耐磨性都因此增加。对此，等温淬火球墨铸铁是一例外，它能在高强度(1000MPa或145ksi)下同时获得相当大的伸长率(高达10%)。等温淬火球墨铸铁(ADI)是一种针形(贝氏体的)铁素体和稳态化奥氏体的结合体(见图2.4-12)。

合金化。球墨铸铁可以用少量的镍、钼或铜进行合金化，以此改善其强度和淬硬性。加入钼的时候，要注意发生晶胞间偏析的可能性。加入较大量的硅、铬、镍或铜，可以提高耐腐蚀、氧化或磨料磨损，或者适合于高温的用途。

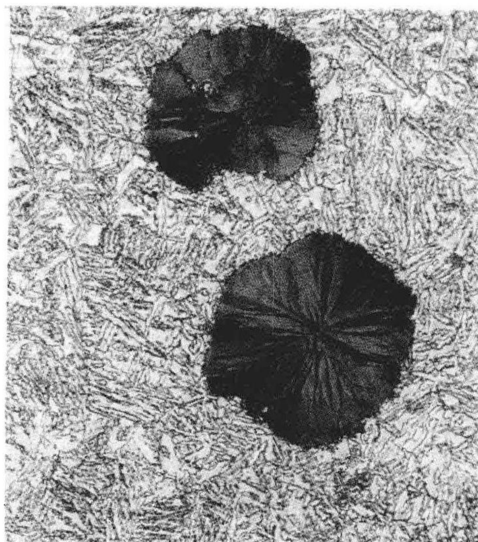


图2.4-12 奥氏体回火球墨铸铁，由球状石墨分布在贝氏体铁素体板条(黑色)和板条间奥氏体的基体上组成

技术规范

标准牌号球墨铸铁的大部分技术规范都是以其性能为依据的。即每一种球墨铸铁的牌号都是按照其强度和/或硬度规定的，而化学成分并不作严格规定或仅作为力学性能的补充。表2.4-11和表2.4-12列出的是目前技术规范所规定的大部分标准球墨铸铁(除了由ASTM A439所规定的高镍、耐腐蚀和耐高温的铸铁以外)的化学成分、性能及其典型用途。如表2.4-12所示，ASTM系统规定的球墨铸铁牌号中包含的数字表示抗拉强度(ksi)、屈服强度(ksi)和伸长率(%)。这种系统也便于对那些满足ASTM A536一般性要求的非标牌号做出规定。例如牌号80-60-03(最小抗拉强度为552MPa或80ksi，屈服强度为414MPa或60ksi，伸长率为3%)的球墨铸铁在不要求较高塑性的用途里应用得十分广泛。牌号65-45-12和60-40-18应用于要求高塑性和耐冲击的用途里。牌号60-42-10和70-50-05则应用于如退火管材和铸造接头的一些特殊用途里。除ASTM A536所列或上面所提到的牌号以外，其他牌号可以按照A536的一般要求进行生产，但是力学性能可以由购货方和生产方双方达成的协议进行规定。

汽车工程师协会(即现在的国际SAE)采用的是以铸件本身材料的显微组织和布氏硬度的方法，用于规定铸件为大批量生产的铸铁。ASTM和SAE的两种技术规范都是以拉伸性能和硬度为标准的。拉伸性能属于一种准静态性能，它并不能用于表示动态性能，如冲击强度和疲劳强度。

用于最高强度牌号的技术规范通常还说明可能有的硬化和回火的组织，但对于最新公布的等温淬火球墨铸铁应查看ASTM A897(表2.4-13)，这种铸铁具有抗拉强度和塑性的最佳结合。

冶炼和金相控制

球墨铸铁生产所要求的金相和工艺控制甚于其他铸铁的生产。它需要频繁地进行化学、力学和金相分析，才能确保其达到所要求的质量并符合技术规范。

表2.4-11　标准牌号球墨铸铁的成分和一般用途

技术规范编号	牌号	UNS	TC[①]	一般性成分(质量分数,%)				状态描述	一般用途
				Si	Mn	P	S		
ASTM A395，ASME SA395	60-40-18	F32800	≥3.00	≤2.50[②]	—	≤0.08	—	铁素体，退火	用于高温的受压力零件
ASTM A476，SAE AMS5316C	80-60-03	F34100	≥3.00[③]	≤3.0	—	≤0.08	≤0.05	铸造	造纸机干燥辊，温度达230℃(450℉)
ASTM A536	60-40-18[④]	F32800						铁素体，可退火	抗冲击零件，可用于低温
	65-45-12[④]	F33100						大部分铁素体，铸造或退火	一般用途
	80-55-06[④]	F33800						铁素体/珠光体，铸造	一般用途
	100-70-03[④]	F34800						大部分珠光体，可正火	强度与耐磨最佳结合，表面硬化最佳
	120-90-02[④]	F36200						马氏体，油淬并回火	最高强度和耐磨
ASTM A716	60-42-10	F32900						离心浇铸	涵管
ASTM A746	60-42-10	—						离心浇铸	重力污水管
ASTM A874[⑤]	45-30-12	—	3.0～37	1.2～2.3	≤0.25	≤0.03	—	铁素体	低温用途
SAE J434	D4018[⑥]	F32800	3.20～4.10	1.80～3.00	0.10～1.00	0.015～0.10	0.005～0.035	铁素体	中等应力零件，要求好塑性和切削性
	D4512[⑥]	F33100						铁素体/珠光体	中等应力零件，要求中等切削性
	D5506[⑥]	F33800						铁素体/珠光体	高应力零件，要求好韧性
	D7003[⑥]	F34800						珠光体	高应力零件，要求极好耐磨适局部硬化

（续）

技术规范编号	牌号	UNS	TC①	一般性成分(质量分数,%)				状态描述	一般用途
				Si	Mn	P	S		
SAE J434	DQ&T⑥	F30000						马氏体	高应力零件，要求均匀显微组织，严控性能
SAE AMS5315C	等级 A	F33101	≥3.00	≤2.50⑦	—	≤0.08	—	铁素体，退火	

注：力学性能和典型应用见表2.4-12。

①TC，总含碳量。 ②w(P)每减少0.01%，硅的极限含量(质量分数)可以增加0.08%，直到2.75%。 ③碳当量CE，3.8~4.5；CE = TC + 0.3(w(Si) + w(P))。 ④成分作为力学性能的补充，所有元素的成分范围可以由供，买双方的协议规定。 ⑤也含(质量分数)0.07%Mg(最高)，0.1%Cu(最高)，1.0%Ni(最高)和0.07%Cr(最高)。 ⑥牌号D4018给出的一般成分仅供参考。一般情况下铸造厂生产的成分范围比表中所列的范围更窄，并且对于不同的牌号设置不同的中值成分。⑦对于截面为13mm(1/2in)和更小的铸件，可以有2.75%Si(最高)并0.08%P(最高)，或3.00Si(最高)并0.05P(最高)；对于截面为50mm(2in)和更大的铸件，CE必须不超过4.3%。

表2.4-12 标准牌号球墨铸铁的力学性能和典型应用

技术规范编号	牌号	硬度① HB	最小抗拉强度②		最小屈服强度②		50mm(2in)长的最小伸长率②(%)	典型应用
			MPa	ksi	MPa	ksi		
ASTM A395，ASME SA395	60-40-18	143~187	414	60	276	40	18	蒸汽动力厂和化工厂的阀门和接头
ASTM A476，SAE AMS5316	80-60-03	≥201	552	80	414	60	3	造纸机干燥辊
ASTM A536	60-40-18	—	414	60	276	40	18	压力零件如阀体和泵体
	65-45-12	—	448	65	310	45	12	承受冲击和疲劳载荷的机器零件
	80-55-06	—	552	80	379	55	6	曲轴，齿轮和轧辊
	100-70-03	—	689	100	483	70	3	高强度齿轮和机器零件
	120-90-02	—	827	120	621	90	2	小齿轮、齿轮、轧辊和滑道
SAE J434	D4018	≤170	414	60	276	40	18	转向接头
	D4512	156~217	448	65	310	45	12	盘式制动钳
	D5506	187~255	552	80	379	55	6	曲轴
	D7003	241~302	689	100	483	70	3	齿轮
	DQ&T	③	④	④	④	④	④	摇臂
SAE AMS 5315C	等级 A	≤190	414	60	310	45	15	电器设备、缸体、泵、壳体、齿轮、阀体、夹钳和液压缸

注：成分、描述和用途可见表2.4-11。

①在铸件上预定的部位进行测量。 ②用取自于分离铸造试块上的标准试件进行测试。 ③范围由供、买双方之间达成的协议规定。 ④数值必须与为生产铸件规定的最低硬度相匹配。

表 2.4-13　ASTM 标准 A897-90 和 A897M-90 规定的等温淬火球墨铸铁所要求的力学性能

牌　号	最小抗拉强度		最小屈服强度		伸长率(%)	冲击吸收功[①]		硬度[③]
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	lbf/ft	HB
125-80-10	—	125	—	80	10	—	75	269～321
850-550-10	850	—	550	—	10	100	—	269～321
150-100-7	—	150	—	100	7	—	60	302～363
1050-700-7	1050	—	700	—	7	80	—	302～363
175-125-4	—	175	—	125	4	—	45	341～444
1200-850-4	1200	—	850	—	4	60	—	341～444
200-155-1	—	200	—	155	1	—	25	388～477
1400-1100-1	1400	—	1100	—	1	35	—	388～477
230～185	—	230	—	185	②	—	②	444～555
1600～1300	1600	—	1300	—	②	②	—	444～555

①在 22℃ ±4℃(72℉ ±7℉)温度下的无缺口夏比试验。表中所列的最小值取自四种试验样品中的三个最大值的平均值。②对伸长率和冲击吸收功的要求不作规定。虽然牌号 200-155-1、1400-1100-1、230-185 和 1600-1300 主要都用于齿轮和耐磨的用途，但牌号 200-155-1、1400-1100-1 也适用在一些为了有限的塑性和韧性宁可牺牲耐磨性的用途里。　③硬度不是强制性的，在表中列出仅供参考。

高质量球墨铸铁的冶炼起始于炉料的仔细选用，以此生产相对纯净的铸铁，避免含有一些在其他铸铁中常发现的不应有的残留元素。必须将碳、锰、硅、磷和硫保持在规定的范围里。为了获得所要求的石墨形状和消除有害元素的不利影响，必须对镁、铈和某些其他元素进行控制，还有一些会干扰球化过程的元素，如锑、铅、钛、碲、铋和锆也必须去除或限制在非常低的含量。

在进行球化工艺以前有必要将 w(S) 降低到 0.02%，为此可以通过单独的碱性熔化、使用低硫炉料或在加入镁球化合金之前，用碱金属脱硫来实现。如果不这样来减少碱性硫，将要求消耗过量的高成本球化合金，并导致熔化效率的降低。

石墨的形状和分布。球化剂主要有三种，它们都含有镁：非合金镁、镍基球化剂和镁-硅铁球化剂。非合金镁以丝、锭块或丸粒的形式加入铁液，也可以与海绵铁结合成为团块的形式，或以具有蜂窝状孔隙的冶金焦炭的形式。将合金加入铁液也有不同的方法，从敞开钢包法(先将合金放在钢包的底部，再将铁液迅速浇到合金的上面)到压力容器法(将非合金镁放在一个容器内，并让其旋转使铁液流到镁的上面)。不论哪一种情况，镁都要被汽化，其蒸气运动通过铁液来降低硫的含量，并促进球状石墨的形成。

试验和检验。可以用不同的试验方法控制球墨铸铁的工艺，而且在球化处理之前和之后开始进行原材料和铁液的分析。利用快速集热法(Rapid thermal-arrest method)测定铁液中的碳、硅和碳当量。硅含量也可用热电和光谱技术进行测定。激冷试验用于生产线上的硅试验。

在球化步骤完成后，应该就像 AFS 推荐的和 ASTM A395 所规定的，用每一炉的金属熔液所浇铸得到的标准试样进行金相显微分析。将试样上的样耳折断并制备抛光后，可以从中揭示石墨的形状和分布及其基体的组织。通过与 ASTM/AFS 标准金相显微照片对照比较，可以对这些特征进行评估，据此比较最后决定铸件是否合格。

拉伸试验所用的试件是按 ASTM A395 规定的用分离铸造的基尔试块，即 Y 试块或改进型的基尔试块切削加工而成的。如果订购的条款要求拉伸试件需取自于铸件，则零件图必须表明试件所在铸件上的部位及其大小。这些条款也必须为供、买双方认可。

生产铸件的硬度也能用于评判与规定的性能是否符合。一些与强度和硬度有关的标准技术规范，如 SAE J434，如表 2.4-12 所示。

热处理。当作为铸件的金属难以达到所要求的性能时，球墨铸铁可以进行热处理。经过热处理的球墨铸铁，尤其是一些截面厚度有很大变化

的球墨铸铁的铸件，可因此获得更加均匀一致的力学性能。

横截面大而又不均匀的球墨铸铁铸件可以在540～660℃(1000～1100℉)的温度里消除应力，以便在后续的切削工序里减少翘曲和扭曲的发生。消除应力工序基本上不会改变铸件的力学性能。

通过完全铁素体化退火生产的牌号60-40-18的球墨铸铁可以应用于要求有最大耐冲击和塑性的用途里。这种热处理通常包括加热到大约900℃(1650℉)保温，然后冷却到大约700℃(1300℉)保温，最后控制冷却到接近室温。

亚临界退火生产的牌号60-40-18或牌号65-45-12的球墨铸铁可以应用于要求高韧性和塑性的用途里。亚临界退火包括加热到730℃(1350℉)保温，直到铁素体组织的形成，接着控制冷却到接近室温。

正火和回火生产的珠光体牌号100-70-03的球墨铸铁被广泛应用于要求有很好的强度和耐磨性的用途里。将铸件加热到大约900℃(1650℉)，保持足够长的时间使组织稳定化，再用风扇或气流快速冷却。然后将铸件再加热到540～675℃(1000～1250℉)，以此消除应力并控制最后的硬度。

马氏体球墨铸铁(牌号120-90-02)的生产过程是通过加热到大约900℃(1650℉)保温，然后在搅拌的油中淬火。这种处理能生产得到强度最高和耐磨性最好的铸件。再经过510～565℃(950至1050℉)的回火消除应力和控制硬度。

等温淬火球墨铸铁(ADI)(表2.4-13)需经过两阶段的热处理。第一阶段为奥氏体化，要求加热并保温到大约900℃(1650℉)。接着第二阶段，要求淬火并等温地保持在等温淬火的温度里，通常置于盐浴中。ADI的性能主要取决于等温淬火的温度和时间，典型的等温淬火分为以下两种：

- 加热到875～925℃(1605～1695℉)并保温2～4h，再在400～450℃(750～840℉)的盐浴中淬火并保持1～6h，然后冷却到室温。
- 与前面方法相同，只是保温在235～350℃(455～660℉)1～6h。

上述第一种处理能产生高塑性、高强度以及中等硬度，还有非常好的加工硬化能力。而第二种处理将产生非常高的强度及一定的塑性，还有相当高的硬度。

图2.4-13比较了铸造的和经受上述热处理的两种球墨铸铁的强度和塑性。进一步有关内容可参阅本手册“热处理”一章。

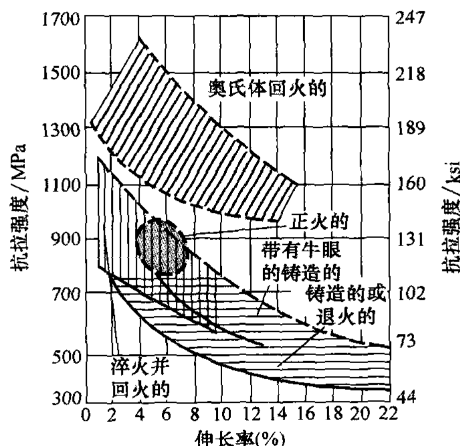


图2.4-13 比较铸造的和经热处理的两种球墨铸铁的强度和塑性范围

力学性能

大部分用于球墨铸铁的标准技术规范都规定了用分离铸造的标准ASTM试棒测定的最小强度和最小塑性。这些不同的技术规范极限值都是通过对上千根这种试棒的试验结果的评价而得出的。试棒性能可作为最后铸件性能有用的近似。试棒的性能还使之有可能对许多不同批次的金属进行比较，而不必顾及铸造形状的不同或不同铸造厂所用生产工艺的不同。

试棒是用基尔试块、Y试块或经改进的基尔试块(详图及尺寸见ASTM A395)切削加工而成的。而试块是为在铸型上部所设置的大型熔化金属浇冒口能进行理想的补缩，和为了达到最佳受控冷却速度而设计的。实际上，由于铸件的形状，这些特征并不一定是经济可行的，甚至是不可能的。结果，生产铸件的实际性能很可能不同于用同一炉次的熔化金属所铸造的试棒的性能，有时这是一个被忽视的情况。

成分的影响。球墨铸铁的性能首先取决于成分。在每一个铸件内部和同一炉次浇铸的所有铸件之间的成分都应该均匀一致。许多元素都会影响铸件的性能，但是最为重要的是那些能对基体组织或石墨球的形状和分布产生重大影响的元素。

碳影响铁液的流动性和铸造金属的收缩特征，而两者都会对铸件的设计产生影响。碳还会影响在凝固过程中生成的石墨颗粒的大小和数量。石墨颗粒的大小和数量还受孕育过程的影响。

硅是一种很强的石墨化剂，在正常的成分限量内，提高硅的含量可促使组织中的铁素体数量逐渐增加。进而，硅还有利于铁素体的固溶强化，铁素体数量的增加能提高塑性并使屈服强度略有提高，但同

时降低抗拉强度和布氏硬度。

在为提高球墨铸铁力学性能而一同使用的合金元素中，锰起到珠光体稳定剂的作用并提高其强度，但会降低塑性。镍常通过促进细珠光体的形成而使强度得以提高。镍还能用于提高淬硬性，特别是在一些表面硬化的用途上。铜可作为珠光体稳定剂使用，用于提高其强度。钼的加入可以稳定在高温下的组织，因此使非合金或低合金的球墨铸铁在高达650℃(1200℉)的温度里仍能保持较好的强度。

石墨形状的影响。在铁液中加入镁(或镁和铈)是为了使石墨从片状转变成球状，为此铸造金属的强度可提高5~7倍。介于完全球状与片状之间(例如按ASTM A247规定的分别处于ASTM Ⅰ和Ⅶ类型里)的石墨形状所产生的力学性能要低于完全球状的球墨铸铁的性能，但还是高于具有类似成分的灰铸铁的性能。

截面尺寸的影响。冷却速度是一个受截面尺寸影响的变量，它反过来又影响石墨球粒的大小和基体的显微组织。截面越大冷却得也越缓慢，因此在凝固中能够形成的石墨球粒也越大。当球墨铸铁浇铸成截面大于65mm(2½in)时，有可能造成石墨形状的衰变(蠕虫形、蟹形等)。通常仔细控制残留物和/或少量铈的存在，对于解决这个问题会有效果的。

基体的组织主要是由通过共析温度范围的冷却速度所决定的，虽然就像在上面“成分的影响”一节里已经讨论过的，合金元素的存在可以改善冷却速度这一特别影响。一般来说，在大型截面中的缓慢冷却速度可以促使铁素体的形成。对于一定的含硅量，减小截面尺寸并提高冷却速度有可能促进珠光体的形成，并伴以强度和硬度的提高以及塑性的降低。在铸造的球墨铸铁里，不常见到贝氏体或马氏体的组织，尽管在非常薄的截面里有可能产生这种组织；这些组织通常都是通过热处理得到的。贝氏体和马氏体都是高强度、经热处理的球墨铸铁，如牌号120-90-02的主要组分。

拉伸性能。表2.4-14列出了同一炉次的球墨铸铁经热处理所达到的抗拉强度，其近似于四种标准球墨铸铁。这些数值并不一定如人们所期待的，能将其作为按牌号生产的金属性能平均值。在每一种的牌号里，其强度和塑性都要根据硬度有所变化，如图2.4-14所示。在一些情况里，预计的强度和塑性范围会与其上一级或下一级牌号的范围相重叠。

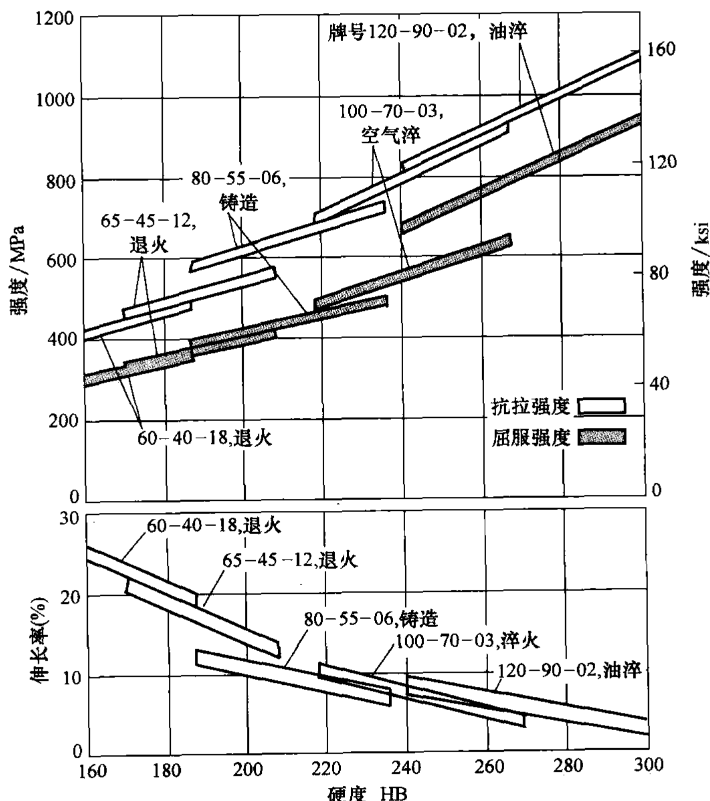


图2.4-14 球墨铸铁的拉伸性能与其硬度的对照，力学性能用取自25mm(1in)基尔试块的试件测定得到

表 2.4-14 热处理到不同强度水平的球墨铸铁的平均力学性能

最为近似的标准牌号	硬度 HB	抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	模量		泊松比
		MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi	
拉伸									
60-40-18	167	461	66.9	329①	47.7①	15.0	169	24.5	0.29
65-45-12	167	461	67.3	332①	48.2①	15.0	168	24.5	0.29
80-55-06	192	559	81.1	362①	52.5①	11.2	168	24.5	0.31
120-90-02	331	974	141.3	864①	125.3①	1.5	164	23.8	0.28
压缩									
60-40-18	167	—	—	359①	52.0①	—	164	23.8	0.26
65-45-12	167	—	—	362①	52.5①	—	163	23.6	0.31
80-55-06	192	—	—	386①	56.0①	—	165	23.9	0.31
120-90-02	331	—	—	920①	133.5①	—	164	23.8	0.27
扭转									
60-40-18	167	472	68.5	195②	28.3②	—	63	9.1	—
							65.5③	9.5③	
65-45-12	167	475	68.9	207②	30.0②	—	64	9.3	—
							65(c)	9.4(c)	
80-55-06	192	504	73.1	193②	28.0②	—	62	9.0	—
							64③	9.3③	
120-90-02	331	875	126.9	492②	71.3②	—	63.4	9.2	—
							64③	9.3③	

注：由单一炉次的球墨铸铁测试得到，经热处理，达到与标准牌号相近似的性能。利用25mm(1in)的基尔试块，经切削加工成的试棒进行试验得到的性能。

①0.2%条件屈服强度。 ②0.0375%。 ③由拉伸模量和拉伸中的泊松比计算而得到。

如表2.4-14所示，拉伸弹性模量的范围从164～169GPa(23.8～24.5×10^6psi)，而且它并不随牌号有很大的变化。表2.4-14所示的拉伸模量值是用直径12.83mm(0.505in)的标准拉伸试棒，在其缩颈处贴上应变片进行测试而得到的。

压缩性能。球墨铸铁0.2%条件屈服强度的压缩屈服强度通常可以按照在拉伸试验中0.2%条件屈服强度的拉伸屈服强度的1.0至1.2倍取值。表2.4-14中所示的压缩性能数据是用前面“拉伸性能”中所述的同一炉次的球墨铸铁试件测试得到的。

扭转性能。球墨铸铁的抗剪强度几乎没有可供使用的数据，因为精确测试一些有塑性的材料的剪切数据是非常困难的。一般公认，对于同一炉次的球墨铸铁，经热处理能达到的强度水平与四种标准球墨铸铁近似的球墨铸铁，其抗剪强度大约是0.9～1.0倍的抗拉强度和条件屈服强度为0.0375%的扭转屈服强度。

减震能力。硬度范围为156～241HB的球墨铸铁的平均减震能力约是1018钢的6.6倍和等级30号灰铸铁的0.12倍。

冲击性能。图2.4-15所示是球墨铸铁冲击性能综合研究的数据结果。这些数据表明增加珠光体将减小冲击吸收功，增加磷和/或硅的含量也将减小冲击吸收功。磷和/或硅的含量会有效影响转变温度，而其他元素在其成分的正常变化范围内几乎不会影响转变温度。

断裂韧度。某些低强度牌号的球墨铸铁在名义平面应变条件下进行标准断裂韧度试验时，并不会发生脆性方式的断裂。这种特性有悖于断裂力学的基本原理，这是由于在每一个球形石墨外围所包裹的铁素体发生局部变形而造成的。在低强度的球墨铸铁里，只有在足够低的温度下使铁素体脆化才会形成平面应变

条件。反之，就是增大断裂韧度试验试件的尺寸，其机械约束也未必能达到为进行 K_{Ic} 的有效测试所必须的程度。

表2.4-15列出了经选择的断裂韧度值。这些值都是用宽度为21mm(0.83in)的致密型试件测试得到的。所有的试验都是按ASTM E399进行的。表2.4-15列出的数据都是用含有50%的近似于ASTM类型I球形石墨的球墨铸铁进行试验得到的。

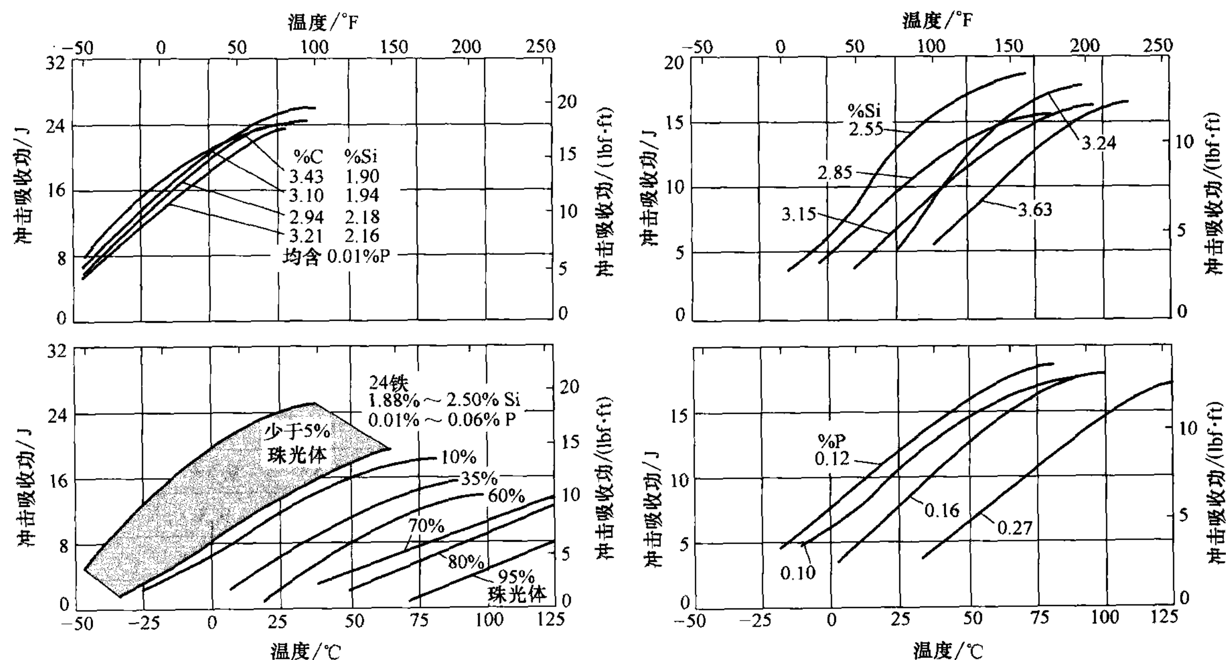


图2.4-15　成分和显微组织对球墨铸铁的夏比V形缺口冲击特性的影响

表2.4-15　球墨铸铁的断裂韧度

铸铁种类	状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	K_{Ic}/[MPa·$m^{1/2}$(ksi·$in^{1/2}$)] 在下列温度下:		
		MPa	ksi	MPa	ksi		20℃(70℉)	-40℃(-40℉)	-105℃(-160℉)
铁素体3.0%Si	铸造	521	75.6	427	62.0	11.0	—	35.1(32.0)	30.2(27.5)
铁素体3.5%Si	铸造	547	79.4	471	68.3	9.0	—	27.0(24.6)	—
铁素体2.5%Si	铸造	703	102.0	374	54.2	7.5	—	37.1(33.8)	—
	正火	918	133.2	552	80.0	3.6	45.3(41.3)	—	—
	等温淬火	—	—	620	90.0①	—	36.5(33.3)	—	—

①估计。

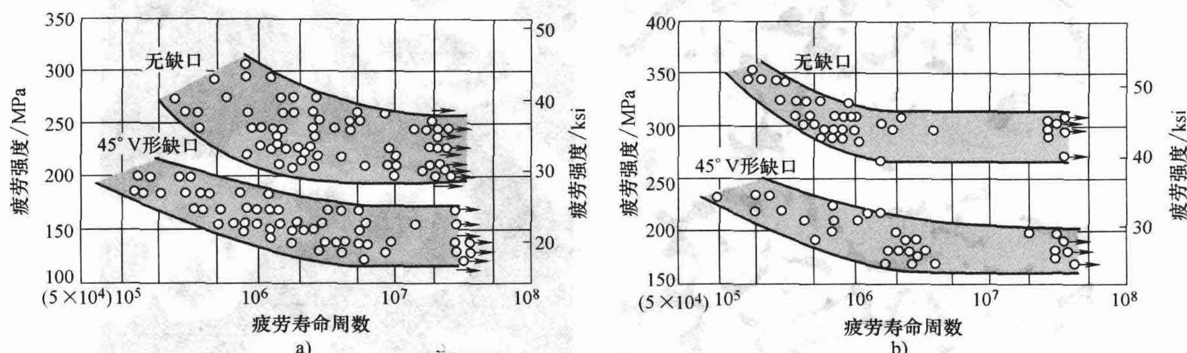
疲劳强度。图2.4-16所示是铁素体和珠光体球墨铸铁在有缺口和无缺口的两种条件下进行试验得到的疲劳强度曲线。这些试验都是在沃尔勒(Wohler)型的疲劳试验机上用经抛光的直径为10.6mm(0.417in)的试件试验完成的。

一种给定牌号的球墨铸铁的疲劳极限取决于其表面状态。疲劳寿命比定义为疲劳极限除以抗拉强度。因为球墨铸铁的疲劳寿命比随抗拉强度的提高而降低，无论何种基体组织，一个结构由于易于发生疲劳失效而规定使用更高强度的球墨铸铁也许没有意义；而通过重新设计，其结构使应力降低可证明是一种较好的解决办法。

高温性能

球墨铸铁所具有的多种性能使其成功地应用于许多高温用途。一些非合金牌号的球墨铸铁能在适中的

温度里保持其强度，而且比非合金灰铸铁能更好地防止其体积增大和抗氧化的性能。高合金球墨铸铁（含镍耐腐性）在高温下更具有突出的抗变形、体积增大和氧化的性能。



牌号	抗拉强度		无缺口			缺口			应力集中系数
			疲劳极限		疲劳比	疲劳极限		疲劳比	
	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi		
60-40-18	480	70	205	30	0.43	125	18	0.26	1.67
80-55-06	680	99	275	40	0.40	165	24	0.24	1.67

图 2.4-16　球墨铸铁在无缺口和45°的夏比V形缺口的两种条件下的疲劳极限和疲劳寿命的对照

精选参考文献

- *Ductile Iron Data for Design Engineers*, QIT-Fer et Titane Inc., 1990.
- Elevated-Temperature Properties of Cast Iron, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 409–427.
- G.N.J. Gilbert, *Engineering Data on Nodular Cast Irons—SI Units*, BCIRA, 1986.
- W.A. Henning, J. Mercer, and M.F. Burdit, Ed., *Ductile Iron Handbook*, American Foundryman's Society, 1992.
- I.C.H. Hughes, Ductile Iron, *Castings*, Vol 15, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 647–666.
- L.R. Jenkins and R.D. Forrest, Ductile Irons, *Properties and Selections: Irons, Steels and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 33–55.
- S. Lampman, Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 665–679.
- Metallurgy and Properties of Ductile Irons, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 54–79.
- T.M. Rouns and K.B. Rundman, Constitution of Austempered Ductile Iron and Kinetics of Austempering, *Trans. AFS*, Vol 95, 1987, p 851–874.
- C.F. Walton, *Gray and Ductile Iron Castings Handbook*, Iron Founder's Society, 1971.

第4节　致密型石墨铸铁

致密型石墨（CG）铸铁是铸铁家族中的最新成员。致密型石墨铸铁过去曾被当成在生产球状石墨铸铁的过程中，由于给铁液中加入的镁或铈数量不足而造成的一种不经意的结果，直到1965年它才开始在铸铁家族中占有一席之地，也随即成为具有独特性能并需使用专门制造工艺的一种材料。

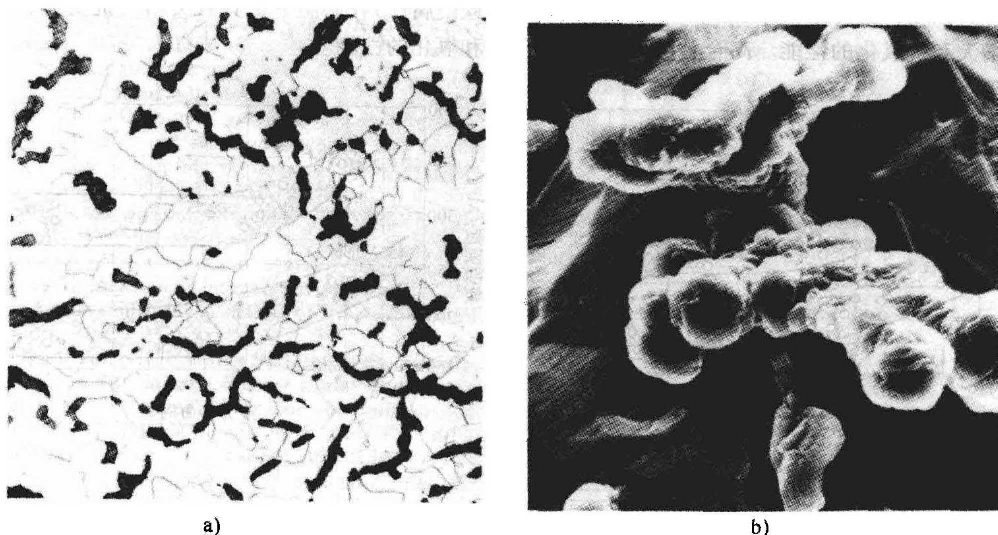
石墨形态

致密型石墨的形状是相当复杂的。作为一种合格的CG铸铁，其组织里并没有片状石墨，而球状石墨也不超过20%，也就是说全部石墨的80%为致密状（蠕虫形的）（ASTM A247，类型Ⅳ）。图2.4-17就是一种典型的CG铸铁的显微组织。可以看到致密型石墨的两维形状是一种长厚比为2～10的石墨板条（见图2.4-17a），扫描电镜（SEM）里的三维组织（见图2.4-17b）并不显示为板条形，而是以共晶晶胞彼此相连而成的晶团。

这种石墨形态使得基体得到较好的利用，产生比包含片状石墨的灰铸铁更高的强度和塑性。片状石墨铸铁与致密型石墨铸铁两者在凝固形式上的相似性，可用于解释与球墨铸铁相比，为什么致密状铸铁具有更好的铸造性。此外，彼此相连的石墨可以使其具有比球墨铸铁更好的导热性和减震能力。

化学成分

碳平衡。CG铸铁的特征性性能可以从一个相当大的碳当量值即CE范围来说明，CE从亚共晶（CE =



a)　　　　b)

图2.4-17　CG铸铁的典型显微组织

a)光学显微照片，用硝酸乙醇腐蚀液腐蚀

b）SEM显微照片，显示CG铸铁中的石墨的真实形状。完全深度腐蚀，395×

3.7）延伸到亚共晶(CE=4.7)，同时w(C)从3.1%～4.0%以及w(Si)从1.7%～3.0%。当硅保持不变时，较低的CE会略增一些白口的可能性，并造成较低的球化率。当CE保持不变时，较高的硅可增加球化率。图2.4-18所示是最佳碳、硅含量。

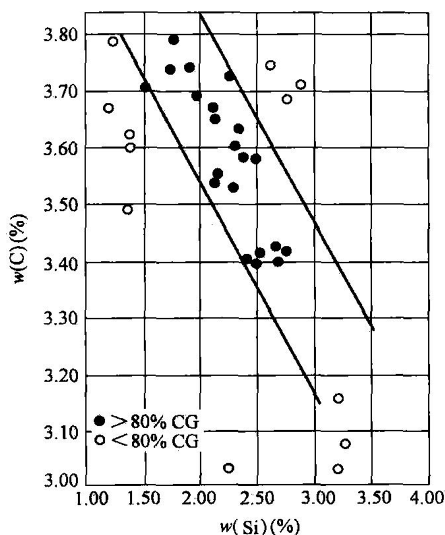


图2.4-18　CG的碳、硅含量的最佳范围

最佳CE必须作为截面尺寸的函数进行选择。截面尺寸一定，过高的CE将会造成石墨的飘浮，就像球状石墨铸铁的情况；而太低的CE会大大增加白口的可能性。对于壁厚范围为10～40mm(0.4～1.4in)的情况，为了获得最佳铸造性能，推荐共晶成分为CE=4.3。

锰和磷含量。CG的w(Mn)可以在0.9%和0.6%之间变化，它取决于是否要求铁素体或珠光体组织。w(P)应该低于0.06%，以便从基体获得最大塑性。

硫含量。虽然CG铸铁是用w(S)高达0.07%～0.12%的碱性铁生产的，在进行液态处理以前，先对铁液进行脱硫，使之达到0.01%～0.025%，这样做也许更为经济。含硫量越高，熔液处理所需要的合金也越多。而且CG铸铁错过其浓度范围的风险也会增大，因为残留的处理元素必须与残留硫保持平衡。经过处理后的w(S)一般为0.01%～0.02%。

熔液处理元素。从碱性铁液中的片状石墨到最终铁液中的致密型石墨的形态变化，是通过以不同铁元素的液态处理而取得的。这些元素可以包括以下元素中的一种或多种：镁、稀土元素（铈、镧和镨等）、钙、钛和铝。其采用的数量和组合取决于液态处理方法(微量元素的含量水平)、碱与硫以及截面厚度。

合金化元素。如铜、锡、钼、甚至铝，都能用于将铸造的CG铸铁基体从铁素体改变为珠光体。一般的含量(质量分数)范围为0.48%～0.9%Cu、0.033%～0.13%Sn以及0.5%～1%Mo。

性能与应用

性能。一般来说，CG铸铁的(力学和物理)性能值介于灰铸铁和球墨铸铁两者之间。与灰铸铁比较，

CG 铸铁有以下优点：

- 在同样的碳当量下具有较高的抗拉强度，由此可减少入镍、铬、铜和钼的一些合金化元素的消耗；
- 较高的抗拉强度与硬度之比；
- 高得多的塑性和韧性，由此形成较高的抗断裂安全系数；
- 减少高温下的氧化和体积增大；
- 对于大型截面，减少其对截面的敏感性。

与球墨铸铁比较，CG 铸铁有以下优点：

- 较低的热膨胀系数；
- 较高的热导率；
- 较好的耐热冲击性；
- 较高的减震能力；
- 较好的铸造性，形成较高的铸造生产率和浇铸更为复杂铸件的能力；
- 切削性的提高。

表 2.4-16 对灰铸铁、球墨铸铁和 CG 铸铁选择了部分性能进行比较。表 2.4-17 所示是以不同的熔液处理方法生产的各种 CG 铸铁的一些拉伸性能。表 2.4-18 列出的是根据 ASTM A842 CG 铸铁所要求的性能。

表 2.4-16 在铸造状态下，铈处理 CG 铸铁与具有相同化学成分的片状石墨(FG)铸铁、高强度珠光体 FG 铸铁和铁素体球墨(SG)铸铁的性能比较

性能		高强度珠光体 FG 铸铁(100%珠光体 100%FG)①	FG 铸铁(100%珠光体 100%FG)②	Ce 处理 CG 铸铁(>95%铁素体，>95%CG)②	SG 铸铁(100%铁素体,80%SG,20%不成形 SG)②
化学成分(质量分数,%)		3.10C、2.10Si、0.60Mn	3.61C、2.49Si、0.05Mn	36.1C、2.54Si、0.05Mn	3.56C、2.72Si、0.05Mn
抗拉强度/MPa(ksi)		317(46)	110(16)	336(48.7)	438(63.5)
0.2%条件屈服强度/MPa(ksi)		—	—	257(37.3)	285(41.3)
伸长率(%)		—	—	6.7	25.3
弹性模量/GPa(10^6psi)		108(15.7)	96.9(14.05)	158(22.9)	176(25.5)
布氏硬度 HB		200	156	150	159
夏比 V 形缺口试棒冲击吸收功/J(lbf·ft)	20℃(68℉)	—	—	9.32(6.87)	24.5(18.1)
	-20℃(-4℉)	—	—	6.57(4.85)	9.81(7.23)
	-40℃(-40℉)	—	—	7.07(5.21)	6.18(4.56)
夏比弯曲冲击吸收功/J(lbf/ft)	20℃(68℉)	4.9	2.0	32.07(23.7)	176.5(130.2)
	-20℃(-4℉)	—	—	26.48(19.5)	148.1(109.2)
	-40℃(-40℉)	—	—	26.67(19.7)	121.6(89.7)
旋转棒疲劳强度/MPa(ksi)		127.5(18.5)	49.0(7.1)	210.8(30.6)	250.0(36.3)
热导率/W/(cm·K)		0.419	0.423	0.356	0.327

①用截面直径尺寸为 30mm(1.2in)的试样测得的力学性能。 ②用截面 23mm(0.9in)Y 试块测得的力学性能。

表 2.4-17 室温下不同 CG 铸铁的拉伸性能、硬度和热导率

组织状态①	石墨类型	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
用加铈处理的铸铁						
铸造铁素体(>95%F)	95%CG，5%SG	336	48.7	257	37.3	6.7
铸造珠光体(>5%P)	95%CG，5%SG	298	43.2	224	32.5	5.3
铸造铁素体(90%F、10%P)	85%CG，15%SG	371	53.2	267	38.7	5.5
100%铁素体	85%CG，15%SG	338	49.0	245	35.5	8.0

（续）

组织状态①	石墨类型	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
用加铈处理的铸铁						
100%铁素体	CG	365 ±63	53 ±9	278 ±42	40 ±6	7.2 ±4.5
铁素体-珠光体(>90%F、<10%P)	>90%CG	300 ~400	43 ~58	250 ~300	36 ~43	3 ~7
铁素体-珠光体(85%F)	70%CG，30%SG	320	46.4	242	35	3.5
珠光体(90%P、10%F)	90%CG	400 ~550	58 ~80	320 ~430	46 ~62	0.5 ~1.5
珠光体(95%P、5%F)	80%CG，20%SG	410	59.5	338	49	1
用Mg + Ti(+Ce)结合物处理的铸铁						
铸造铁素体(0.04%Ce、<0.01%Mg、0.28%Ti)	95%CG，5%SG	319	46.3	264	38.3	4
100%铁素体(退火)(0.018%Mg、0.089%Ti、0.032%As)	CG	292	42.3	225	32.6	6
铸造铁素体(0.017%Mg、0.062% Ti、0.036%As)	CG	380	55	272	39.4	2
铸造铁素体(0.024%Mg、0.084% Ti、0.030%As)	CG	388	56.3	276	40	2.5
铸造珠光体(0.016%Mg、0.094% Ti、0.067%As)	CG	414	60	297	43.1	2
铸造珠光体(0.026%Mg、0.083% Ti、0.074%As)	CG + SG	473	68.6	335	48.6	2
铸造珠光体(70%P、30%F)	CG	386	56.0	278	40.3	2

①F，铁素体；P，珠光体。

表 2.4-18 按照 ASTM A842CG 铸铁所要求的性能

牌号①	最小抗拉强度		最小屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度 HB	BID② /mm
	MPa	ksi	MPa	ksi			
250③	250	36.3	175	25.4	3.0	179max	4.50min
300	300	43.5	210	30.5	1.5	149 ~207	5.0 ~4.2
350	350	50.8	245	35.5	1.0	163 ~229	4.7 ~4.0
400	400	58.0	280	40.6	1.0	197 ~255	4.3 ~3.8
450④	450	65.3	315	45.7	1.0	207 ~269	4.2 ~3.7

①按照给定的最小抗拉强度要求值规定牌号，单位为 MPa。 ②布氏压痕直径(BID)指的是直径为 10mm 的钢球在 3000kgf 载荷作用下的压痕。 ③牌号 250 为铁素体的牌号。通过热处理达到所要求的力学性能，且其显微组织由制造商选定。 ④牌号 450 是珠光体牌号，通常生产不需要热处理，而是加入一定的合金促使珠光体成为基体的主要部分。

应用。在所有使用灰铸铁因为强度不足，而使用球墨铸铁又因为其铸造性能不太合适的用途里，都可以使用致密型石墨铸铁。例子包括用于大型柴油发动机底板、曲轴箱、齿轮箱、涡轮增压器壳体、连接叉、轴承支架、卡车伺服驱动传动带轮、链轮和偏心齿轮的机座。

由于CG铸铁的热导率高于球墨铸铁，所以CG铸铁特别适合于在高温和/或热疲劳条件下使用。其应用包括锭模、排气歧管和制动盘。

精选参考文献

- J. Fowler, D.M. Stefanescu, and T. Prucha, Production of Ferritic and Pearlitic Grades of Compacted Graphite Cast Iron by the In-Mold Process, Trans. AFS, Vol 92, 1984, p 361.
- G.F. Sergeant and E.R. Evans, The Production and Properties of Compacted Graphite Irons, Br. Foundryman, Vol 71, 1978, p 115.
- D.M. Stefanescu, R. Hummer, and E. Nechtelberger, Compacted Graphite Irons, *Casting*, Vol 15, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 667–677.
- D.M. Stefanescu, Compacted Graphite Iron, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 56–70.
- K.R. Ziegler and J.F. Wallace, The Effect of Matrix Structure and Alloying on the Properties of Compacted Graphite Iron, *Trans. AFS*, Vol 92, 1984, p 735.

第5节 可 锻 铸 铁

可锻铸铁是一种大部分碳都以不规则的石墨球团的形式而存在的铸铁，它们既不像灰铸铁里的片状石墨，也不像球墨铸铁里布满的细小石墨球。可锻铸铁的生产先是像白口铸铁那样铸造铸铁，然后通过热处理使碳化铁转化为不规则形状的石墨球团。可锻铸铁中，这种形式的石墨称为二次石墨，因为它是在热处理的固态过程中形成的。图2.4-19所示是典型的可锻铸铁的显微组织。

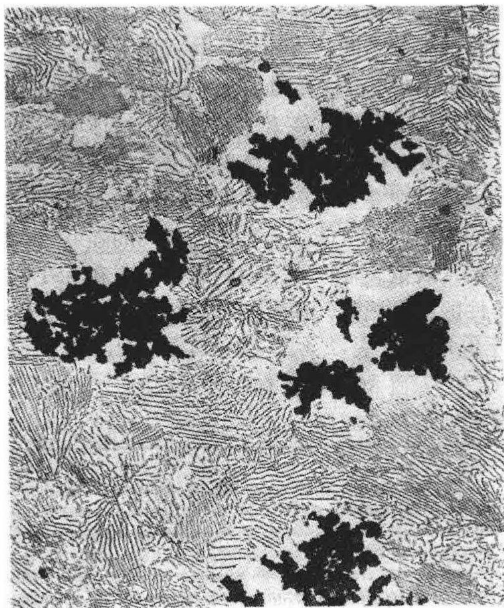


图2.4-19 典型可锻铸铁的显微组织，显示出以回火碳形式的石墨。4%苦味醇液腐蚀，250×

可锻铸铁可以分为三类：铁素体可锻铸铁、珠光体可锻铸铁和马氏体可锻铸铁。而铁素体可锻铸铁又分为“黑心”和“白心”两种。在美国只生产黑心型的。这是一种有二次石墨球粒散布在铁素体基体里的材料。“冲天炉可锻铸铁”是一种用冲天炉熔化生产的黑心可锻铸铁，用于管件及类似的薄壁铸件。由于它的低强度和低塑性，冲天炉可锻铸铁通常规定不用于结构用途。珠光体可锻铸铁被开发成为基体里含有化合碳，所以具有比铁素体可锻铸铁更高的强度和硬度。马氏体可锻铸铁是珠光体可锻铸铁经过淬火和回火生产得到的。

像球墨铸铁一样，可锻铸铁具有相当的塑性和韧性，这是因为其球团状石墨和低碳金属基体的结合。因此可锻铸铁和球墨铸铁适用于一些需要有良好塑性和韧性的相同用途，两者之间的选择主要根据经济性而不是性能。然而，由于球墨铸铁件拥有与可锻铸铁件相似的性能而不需要长时间和昂贵的热处理，所以如今可锻铸铁的产量非常低，只用于一些薄壁铸件上。因为在可锻铸铁生产中重要的是整个截面都凝固成白口铸铁，所以当截面太厚而无法凝固成白口铸铁时，球墨铸铁则显示出其优势所在。可锻铸铁能生产的铸件截面厚度范围约为1.5～100mm($\frac{1}{16}$～4in)，而且重量从不到30g(1oz)～180kg(400lb)或以上。

冶炼控制

在可锻铸铁中，需要形成的二次石墨应当有两个基本要求：在白口铸铁凝固的过程中不应该生成石墨，而在退火热处理的过程中必须易于形成石墨。这些冶炼上的要求会影响到可锻铸铁中的有用成分，及其熔化、凝固和退火等工艺流程。冶炼控制主要依据以下准则：

- 在全部截面厚度上都要凝固生成白口铸铁；
- 出于经济效益考虑，所设置的时间-温度的退火周期应调整为最小值；
- 通过退火产生所要求的石墨分布(球团数量)。

在熔化操作或成分上的改变若能满足上述第一条原则的要求，一般就不能满足第二和第三条原则的要求；而且若能提高其退火性能超过到一定程度，则极可能造成铸造后成为不合格的麻口铸铁而不是白口铸铁。

成分。基于以上所述的两个冶炼要求，可锻铸铁有一个化学成分的限制范围，而且合金的使用也要受到限制。可锻铸铁的化学成分一般符合表2.4-19所列的范围。

表 2.4-19　可锻铸铁的典型成分

元　素	成分(质量分数,%)	
	铁　素　体	珠　光　体
总碳	2.2～2.9	2.0～2.9
硅	0.9～1.9	0.9～1.9
锰	0.2～0.6	0.2～1.3
硫	0.02～0.2	0.05～0.2
磷	0.02～0.2	0.02～0.2

可锻铸铁里的通用性元素一般都控制在±0.05%～±0.15%左右。为了保证机械质量和退火性，可锻铸铁要求有最小含碳量的限制，因为含碳量的减少会降低铁液的流动性，并在凝固的过程中会增加收缩性，同时降低退火性。由于铸件要求铸造成白口铸铁，故必须有最大含碳量的限制。限制硅的含量范围是为了能在快速退火周期里和在大批量退火的工艺流程里确保合适的退火，并防止在白口铸铁的凝固过程中生成初生石墨(即所谓的麻口)。锰和硫之间的平衡是为了保证所有的硫都与锰化合，而且在铁里也只有安全的、最少的过量锰存在。无论硫还是锰的过量存在都将延迟第二阶段的退火过程，从而增加退火成本。

除了在表2.4-19中所列的通用性元素外，可锻铸铁还含有一些作为钢包添加剂加入的微量元素。这些元素包括促进退火时石墨化的硼($w(B)<0.004\%$)和铝($w(Al)$为0.005%)，以及阻止麻口化的铋($w(Bi)$为0.01%)和碲($w(Te)<0.004\%$)。

热处理。这是一个两阶段的工艺流程。第一阶段为碳析出，第二阶段则形成钢的基体组织。第一阶段是在900～970℃(1650～1780℉)温度下，根据截面的大小和成分处理3～6小时。在此期间碳化铁转化为石墨。用较高的温度可以缩短退火的时间并增加球团的数量，然而随退火温度的升高，冷却过程中铸件翘曲的可能性也会增大。所生成的石墨球团的数量取决于碳、硅含量，一般来说作为最佳性能它应当在80和150mm^{2}之间(原文如此,似应为每平方毫米里的数量为80个和150个——译者注)，此时放大倍数为100×。

为了生成铁素体可锻铸铁(即其基体为铁素体)，使铸件冷却到740～760℃(1650～1780℉)，根据铸件的形状，其过程需1～6h。随后铸件以3～11℃/h(5～20℉/h)的速度冷却。随铸件的冷却，其基体里的碳会扩散到二次石墨的球团里，留下的则是铁素体基体。

在生产珠光体可锻铸铁的过程中，第一阶段的石墨化阶段与铁素体可锻铸铁的一样。但是在第一阶段结束时，铸件缓慢冷却到大约870℃(1600℉)并在空气(用风吹铸件)或油中快速冷却，然后按照技术规范在590～725℃(100～1340℉)之间进行回火处理(在较低的温度里保持一段时间)。

显微组织/性能的关系。可锻铸铁的力学性能主要决定于基体的显微组织，因此力学性能也就与各种显微组织的相对硬度有很大的关系。这种显微组织对可锻铸铁的一般性影响也与其他许多钢和铁相似。较软的铁素体基体能形成最高塑性，但强度较低，而增加珠光体能提高硬度和强度，但要降低塑性。马氏体能进一步提高硬度和强度，但塑性还会再度下降。

铁素体可锻铸铁

由于铁素体可锻铸铁仅由铁素体和二次石墨组成，所以铁素体可锻铸铁的性能取决于二次石墨的数量、大小和分布，以及铁素体的成分。完全退火的铁素体可锻铸铁铸件里一般按重量含有2.00%～2.70%的石墨碳，按体积相当于大约6至8%。因为石墨碳对铸件的强度不起什么作用，故石墨含量少的比含量多的(假定两者石墨颗粒的大小和分布相同)强度和塑性都更高一些。在铁素体基体的固溶体中，像硅和锰这样的元素能提高铁素体的强度，但会降低其伸长率。因此，在完全退火的铁素体产品中通过改变基体金属的成分则有可能获得有略为不同的强度。

技术规范。根据所采用的熔炼工艺和ASTM适用于铸件的技术规范，铁素体可锻铸铁可以按三种牌号进行生产。见表2.4-20和2.4-21中所列的ASTM A47、A197和A602，还有牌号M3210。

表 2.4-20　有关可锻铸铁的技术规范及其应用

技术规范编号	等级或牌号[①]	ASTM公制相当等级[②]	显微组织	一般用途
铁素体				
ASTM A47[③]	32510	22010	二次石墨和铁素体	常温和高温下的一般工程用途，良好切削性和优异的抗冲击性

（续）

技术规范编号	等级或牌号①	ASTM 公制相当等级②	显微组织	一般用途
铁素体				
ASTM A338	④	—	二次石墨和铁素体	用于铁道，船舶及其他重载用途里的法兰、管件和阀件温度达345℃(650℉)
ASTM A197/A197M	⑤	—	无初生石墨	压力用途里的管件和阀件
珠光体和马氏体				
ASTM A220③	40010	280M10	二次石墨存在于必要的无初生渗碳体或石墨的基体里	常温和高温下的一般工程用途，对于铸件有尺寸公差范围的规定
	45008	310M8		
	45006	310M6		
	50005	340M5		
	60004	410M4		
	70003	480M3		
	80002	550M2		
	90001	620M1		
汽车				
ASTM A602，SAEJ158	M3210	—	铁素体的	要求有良好切削性的低应力零件：转向机体、搬运机械和安装支架
	M4504	—	铁素体和回火珠光体⑥	压缩机曲轴和轮毂
	M5003	—		用于选择性硬化：行星齿轮支架、传动齿轮和差动齿轮箱
	M5503	—	回火马氏体	用于切削性和对感应硬化有较好的效果
	M7002	—		用于高强度零件：连杆和万向联轴器叉头
	M8501			用于高强度并高耐磨：特种齿轮

注：力学性能见表2.4-21。

①牌号的前三位数表示最小屈服强度(×100psi)；最后两位数表示最小伸长率(%)。 ②用注脚表示ASTM技术规范。③提供了一种与公制相当的等级，其前三位表示最小屈服强度，单位为MPa。用字头“M”表示的技术规范，使用的是与公制相当的等级代号。 ④按照ASTM A47，为镀锌可锻铸铁。 ⑤冲天炉铁素体可锻铸铁。 ⑥对于某些用途，可以全是回火马氏体。

力学性能。在设计中最重要的力学性能是抗拉强度、屈服强度、弹性模量、疲劳强度以及冲击强度。硬度可以近似考虑为完成铁素体化退火的标志。铁素体可锻铸铁的硬度范围几乎都为110～156HB，而且受到总的含碳量和含硅量的影响。表2.4-21所示是未经切削加工的铁素体可锻铸铁试棒的一般性能。

表2.4-21 可锻铸铁铸件力学性能

技术规范编号	等级或牌号	抗拉强度		屈服强度		硬度	伸长率①(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi		
铁素体							
ASTM A47/A47M和A338	32510	340	50	220	32.5	156最大	10
ASTM A197	—	276	40	207	30	156最大	5

（续）

技术规范编号	等级或牌号	抗拉强度		屈服强度		硬　度	伸长率[①](%)
		MPa	ksi	MPa	ksi		
珠光体和马氏体							
ASTM A220/A220M	40010	400	60	276	40	149 ~ 197	10
	45008	450	65	310	45	156 ~ 197	8
	45006	450	65	310	45	156 ~ 207	6
	50005	480	70	345	50	179 ~ 229	5
	60004	550	80	414	60	197 ~ 241	4
	70003	590	85	483	70	217 ~ 269	3
	80002	655	95	552	80	241 ~ 285	2
	90001	720	105	621	90	269 ~ 321	1
汽车							
ASTM A602, SAE J158	M3210[②]	345	50	224	32	156 最大	10
	M4504[③]	448	65	310	45	163 ~ 217	4
	M5003[④]	517	75	345	50	187 ~ 241	3
	M5503[④]	517	75	379	55	187 ~ 241	3
	M7002[④]	621	90	483	70	229 ~ 269	2
	M8501[④]	724	105	586	85	269 ~ 302	1

注：显微组织和典型用途见表2.4-21。

①最小，以50mm(2in)。　②退火。　③空气淬火并回火。　④液体淬火并回火。

珠光体和马氏体可锻铸铁

珠光体和珠光体-马氏体可锻铸铁可以在一个很大的力学性能范围里生产，具体取决于热处理、合金化和熔化工艺。在经第一阶段退火后，让铸件在空气里冷却常可以生产较低强度珠光体可锻铸铁，而较高强度(珠光体-马氏体)可锻铸铁可以在第一阶段退火后通过液体淬火生产得到。

技术规范。用于珠光体和马氏体可锻铸铁的一些技术规范都是根据一定的最小拉伸、屈服和塑性能数值要求，并参照布氏硬度来确定其牌号的代号(表2.4-20和表2.4-21)。硬度的所谓“参照”是因为针对不同牌号的硬度范围，其相互间有较大的重叠，故单用硬度并不能保证给定铸件能够满足特定牌号的技术指标(如见ASTM A220)。其他技术规范(如ASTM A602和SAE J158)则是根据所要求的硬度范围和显微组织，而将拉伸性能的数据作为参考。

力学性能。珠光体和马氏体可锻铸铁的力学性能基本上以近似线性关系随布氏硬度而变化。在低硬度范围里，大约低于207HB，空气淬火并回火的珠光体可锻铸铁的性能与油淬并回火的马氏体可锻铸铁的基本一样。这是因为所达到的低硬度要求基体碳化物有相当程度的粗化以及第二阶段的部分石墨化。无论是空气淬火的珠光体组织还是油淬马氏体组织都能被粗化和脱碳，以此满足其硬度的要求。

对于更高的硬度，油淬并回火的可锻铸铁有比空气淬火并回火的可锻铸铁有更高的屈服强度和伸长率，因为其基体组织更为均匀，碳化物颗粒分布也更细密。工业生产的油淬并回火的珠光体可锻铸铁的硬度高达321HB(表2.4-21)，而大批量生产的空气淬火并回火的马氏体可锻铸铁的最高硬度约为255HB。空气淬火材料的最高硬度比较低是因为：

- 用空气淬火的硬度通常不超过321HB，甚至低至269HB。因此，试图通过回火达到255HB以上的硬度范围会产生不均匀的硬度，并使得工艺控制的极限值被超过。
- 在回火处理达到较高硬度的过程中极少发生组织变化，由此造成在同样的硬度条件下对其进行切削，要远比对油淬并回火的组织进行切削困难得多。
- 硬度提高到255HB以上，对于它的其他力学

性能只是稍有提高。

基于上述考虑，空气淬火并回火的珠光体可锻铸铁通常适用于要求中等强度的用途。至于高强度的用途，则需要用油淬并回火的材料。

精选参考文献

- G.N.J. Gilbert, *Engineering Data on Malleable Cast Irons*, British Cast Iron Research Association, 1968.
- S. Lampman, Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 665–679.
- Malleable Iron, *Casting*, Vol 15, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 686–697.
- Malleable Iron, *Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 84.
- L.W.L. Smith et al., *Properties of Modern Malleable Irons*, BCIRA International Center for Cast Metals Technology, 1987.

第6节 合 金 铸 铁

合金铸铁可认为是一种基于Fe-C-Si系统的铸造合金，含有一种或多种特意加入的合金元素旨在增强其一种或多种性能。加入的少量物质（例如硅铁、铈或镁）用于控制石墨颗粒的大小、形状和/或分布，称之为孕育，而不是合金化。用于孕育的材料数量既不改变固态铁的基本成分，也不改变各种组分的性质。作为合金元素包括硅，当其含量（质量分数）超过3%，通常加入是为了提高碱性铁的强度、硬度、淬硬性或耐腐蚀性，而且它们加入的数量足以影响显微组织中组分的产生、性质或分布。

在灰铸铁和球墨铸铁里的少量合金元素（如铬、钼或镍），主要用于获得高强度或保证其厚截面也能达到规定的最低强度。此外，合金元素几乎无一例外地用于增强耐磨料磨损或耐化学腐蚀，或者将其扩展到高温的用途。

合金铸铁的种类

合金铸铁能广义地分成无石墨铸铁、高合金铸铁（白口铸铁）或石墨高合金铸铁（含石墨的球墨铸铁或灰铸铁）。表2.4-22列出了不同种类合金铸铁的大致合金含量范围，它们还可以进一步分成耐磨料磨损铸铁、耐腐蚀铸铁及耐高温铸铁。每一种类中的各种合金都要按照一定的成分制造，而在该成分中的一种或多种合金元素的实际含量范围只是表里所示范围的一部分。表中所列的范围仅起到分辨在特定种类用途中所使用的合金种类。

表2.4-22 各类合金铸铁的合金含量范围

描述	成分①（质量分数，%）									基体组织，铸造③
	TC②	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	
耐磨料磨损白口铸铁										
低碳白口铸铁④	2.2~2.8	0.2~0.6	0.15	0.15	1.0~1.6	1.5	1.0	0.5	⑤	CP
高碳，低硅白口铸铁	2.8~3.6	0.3~2.0	0.30	0.15	0.3~1.0	2.5	3.0	1.0	⑤	CP
马氏体镍-铬铸铁	2.5~3.7	1.3	0.30	0.15	0.8	2.7~5.0	1.1~4.0	1.0	—	M，A
马氏体镍，高铬铸铁	2.5~3.6	1.3	0.10	0.15	1.0~2.2	5~7	7~11	1.0	—	M，A
马氏体铬钼铸铁	2.0~3.6	0.5~1.5	0.10	0.06	1.0	1.5	11~23	0.5~3.5	1.2	M，A
高铬铸铁	2.3~3.0	0.5~1.5	0.10	0.06	1.0	1.5	23~28	1.5	1.2	M
耐腐蚀铸铁										
高硅铸铁⑥	0.4~1.1	1.5	0.15	0.15	14~17	—	5.0	1.0	0.5	F
高铬铸铁	1.2~4.0	0.3~1.5	0.15	0.15	0.5~3.0	5.0	12~35	4.0	3.0	M，F
镍铬灰铸铁⑦	3.0	0.5~1.5	0.08	0.12	1.0~2.8	13.5~36	1.5~6.0	1.0	7.5	A
镍铬球墨铸铁⑧	3.0	0.7~4.5	0.08	0.12	1.0~3.0	18~36	1.0~5.5	1.0	—	A
耐热灰铸铁（原文为High ~ resistant gray iron，似为Heat ~ resistant gray iron之误——译者注）										
中硅铸铁⑨	1.6~2.5	0.4~0.8	0.30	0.10	4.0~7.0	—	—	—	—	F
镍-铬铸铁⑦	1.8~3.0	0.4~1.5	0.15	0.15	1.0~2.75	13.5~36	1.8~6.0	1.0	7.5	A
镍铬硅铸铁⑩	1.8~2.6	0.4~1.0	0.10	0.10	5.0~6.0	13~43	1.8~5.5	1.0	10.0	A

（续）

描述	成分①（质量分数，%）									基体组织，铸造③
	TC②	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	
耐热灰铸铁（原文为 High ~ resistant gray iron，似为 Heat ~ resistant gray iron 之误——译者注）										
高铝铸铁	1.3 ~ 2.0	0.4 ~ 1.0	0.15	0.15	1.3 ~ 6.0	—	20 ~ 25Al	—	—	F
耐热球墨铸铁										
中硅球墨铸铁	2.8 ~ 3.8	0.2 ~ 0.6	0.08	0.12	2.5 ~ 6.0	1.5	—	2.0	—	F
镍铬球墨铸铁⑧	3.0	0.7 ~ 2.4	0.08	0.12	1.75 ~ 5.5	18 ~ 36	1.75 ~ 3.5	1.0	—	A
耐热白口铸铁										
铁素体牌号	1 ~ 2.5	0.3 ~ 1.5	—	—	0.5 ~ 2.5	—	30 ~ 35	—	—	F
奥氏体牌号	1 ~ 2.0	0.3 ~ 1.5	—	—	0.5 ~ 2.5	10 ~ 15	15 ~ 30	—	—	A

①如为单一数字而不是范围的表示的是最大值。 ②总含碳量。 ③CP，粗大珠光体；M，马氏体；A，奥氏体；F，铁素体。 ④能用可锻铸铁基础成分进行生产。 ⑤铜可以部分或全部替代镍。 ⑥像硅铁，杜里科洛尔（Durichlor）51，过氯乙烷（Superchlor）（ASTM A518）。 ⑦像镍耐腐奥氏体铁（ASTM A436）。 ⑧像镍耐腐奥氏体球墨铸铁（ASTM A439）。 ⑨像含硅耐热铸铁（Selal）。 ⑩像镍铬硅（合金）铸铁（Nicrosilal）。

白口铸铁。起名于其特征性的白色断口表面，其显微组织里不含任何石墨。碳是以碳化物的形式存在的，主要为 Fe_3C 和 Cr_7C_3。常也以复合碳化物的形式存在，如通过加入（质量分数）3%～5% Ni 和 1.5%～2.5% Cr 而成为 $(Fe、Cr)_3C$，通过加入 11%～35% Cr 而成为 $(Cr、Fe)_7C_3$，或者含有其他构成元素的碳化物。

白口铸铁通常非常硬，这也是其独特的特性，也就因此才具有优异的耐磨料磨损性。白口铸铁能以整体生产（主要通过调整成分），或只是从表面向内部延续一部分（主要通过紧贴冷铁进行浇铸）进行生产。后者也称激冷铸铁，以此区别于整体的白口铸铁。

激冷铸铁的铸件是通过紧贴金属或石墨的冷铁浇注熔液金属而生产的，以致在其表面实际上不再含有石墨碳。在生产激冷铸铁的过程中，选择成分要仅使贴着冷铁浇注的表面上不含石墨碳（见图 2.4-20）。铸件里较为缓慢冷却的部分将依然为灰铸铁或麻口铸铁。激冷部分的深度和硬度可以通过调整金属的成分、孕育的程度和浇铸温度进行控制。

白口铸铁是一种实际上没有石墨碳的铸铁。选择成分要根据所要求的截面大小，使得在铸件凝固时没有石墨生成。通过调节成分可以控制白口铸铁的硬度。

激冷铸铁和白口铸铁间在显微组织上的差别在于，激冷铸铁里的晶粒是细微晶粒，并且呈现出与激冷表面相垂直的方向；而白口铸铁里的常都是粗大晶粒，并呈现出随机方向，而且整体显示白色，甚至在较厚的截面上都是这样。这种差异反映了这两类耐磨料磨损铸铁在成分上的不同。激冷铸铁的方向性仅仅是因为原本由灰色成分构成的铸件从其一个或多个凝固成白色的表面以极快的速度冷却通过共晶温度，于是从激冷表面向内部延伸。另一方面，白口铸铁还有一些 CE 很低或合金含量很高的成分，以致即使在最厚的铸件截面心部以较为缓慢的速度冷却也难以产生灰铸铁。

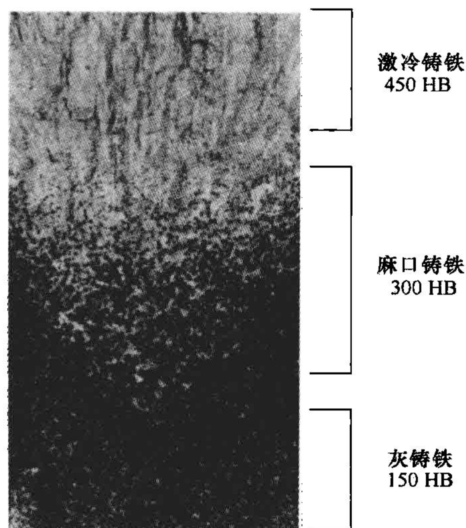


图 2.4-20 铸造的激冷铸铁的断口表面。全尺寸从顶面到底面的白口铸铁、麻口铸铁和灰铸铁部分

耐腐蚀铸铁。其耐化学侵蚀的能力主要来自于高合金元素含量。根据以三种合金元素中的某一种作为其主要成分（硅可高达 15%，铬可高达 28% 或镍可高达 35%），耐腐蚀铸铁的显微组织可以是铁素体、珠光体、马氏体或奥氏体。根据成分、冷却速度和孕育方法，耐腐蚀铸铁可以有白色、灰色或球状作为其碳

的形态和分布。

耐热铸铁。它将耐高温氧化、锈蚀与防止软化或显微组织的劣化结合在一起。耐锈蚀主要依靠高合金含量，防软化取决于初始显微组织加上含碳相的稳定性。耐热铸铁通常为铸造铁素体或铸造奥氏体，碳主要作为石墨而存在，但可以是片状或是球状，故耐热铸铁也可再分为灰铸铁或球墨铸铁。它也有铁素体和奥氏体白口铸铁的牌号，尽管不经常使用也没有 ASTM 代号。

合金元素的影响

在大部分的铸铁里，正是合金元素（包括碳和硅）之间的相互作用对其性能产生了最大的影响。而这种影响在很大程度上体现在铸件中石墨碳的数量和形状所起的作用。例如激冷的深度或铸造变成白口的可能性很大程度上取决于碳当量以及碳与硅之间在成分上的平衡，而其他元素的加入只能对建立在碳硅关系上的基本趋势进行改善。

一般来说，改善激冷深度、硬度和强度只需少量的合金化元素。对于低到中合金铸铁，通常所使用的合金化元素对其激冷深度的具体影响如图 2.4-21 所示。若要最为显著地提高防腐蚀性及高温性能，则需要高合金含量。

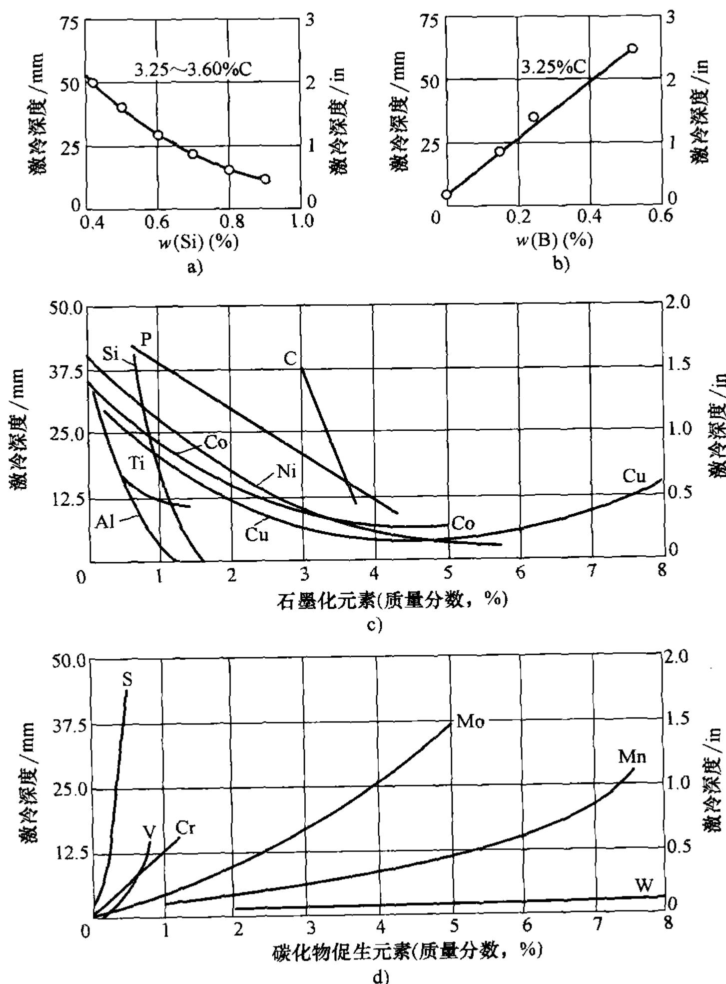


图 2.4-21 合金化元素对激冷深度的典型影响

碳。在激冷铸铁里，激冷深度和激冷区的硬度随含碳量的增加而下降（见图 2.4-21c）。碳还能提高白口铸铁的硬度。

硅。它存在于所有的铸铁里。硅在合金铸铁里一如在其他铸铁里，都是决定共晶体里的碳含量的主要因素。提高硅含量会降低共晶体里的碳含量，并且在凝固过程中促使石墨的形成。因此，对于经过激冷的非合金或低铬铸铁以及白口铸铁，硅含量是控制激冷深度的主要因素。图 2.4-21a 概括了相对于高碳铸铁的这种影响。

加入4.5%至8%Si(质量分数)，通过提高共析转变温度并且降低锈蚀速度和晶体生长速度来改善其高温性能。加入14%~17%Si(质量分数)(往往伴随加入大约5%Cr和1%Mo)可以产生非常耐酸腐蚀的铸铁，其耐腐性还跟酸的浓度有些关系。

高硅铸铁的铸造是很困难的，事实上也没法加工。高硅铸铁在室温或中高温承受机械冲击和热冲击的性能特别差。然而高于大约250℃(500℉)时，其耐冲击性却超过一般的灰铸铁。

锰和硫。对于灰铸铁和白口铸铁应该将锰和硫的影响一起考虑。单独的锰或硫都会增加激冷深度，但是若已存在一种元素，那么再加入另一种其深度就会减小，直到残留的浓度都被生成的硫化锰抵消为止。一般来说，硫是一种残留元素，使用过量的锰可以增加激冷深度和硬度，如图2.4-21d所示。因为它能促成更细更硬的珠光体的生成，锰常用于减少和防止在厚截面铸件里的麻口化。

锰的含量如果超过清除硫所用的量，则能适当地阻止珠光体的形成。它还是一种较强的奥氏体稳定剂，通常在马氏体白口铸铁里w(Mn)保持低于接近0.7%，在一些珠光体或铁素体合金铸铁里，w(Mn)保持高达接近1.5%，将有助于保证得到规定的强度等级。

磷。在非合金铸铁里，它是一种较为柔和的石墨化剂，在激冷铸铁里它能稍微减小一些激冷深度(见图2.4-21c)。在合金铸铁里，磷的作用有些模糊。但有一点是清楚的，即能降低马氏体白口铸铁的韧性。

铬。它在铸铁里有三个主要用处：形成碳化物、产生耐腐蚀的能力，并且在高温用途里稳定组织。加入少量铬，通常可以在灰铸铁里稳定珠光体，在激冷铸铁里控制激冷深度，或对含有$<1\%$Si(质量分数)的白口铸铁能确保其无石墨组织。通常w(Cr)低至不超过2%~3%，对淬硬性几乎不起作用，这主要因为大部分的铬都被束缚在碳化物里。然而，铬确实能影响珠光体的细度和硬度，还有可能提高共晶碳化物的硬度。

当铸铁的w(Cr)超过近10%时，形成的是M_7C_3型的共晶碳化物而不是含铬量较低的M_3C型的。然而更为重要的是较高的含铬量会引起凝固模式的变化，即形成一种由奥氏体基体或其转化物包围M_7C_3的组织。而在含铬量较低的情况下，M_3C碳化物会成为其基体。鉴于其凝固特征，含有M_7C_3碳化物的亚共晶铸铁的强度和韧性通常都比含有M_3C碳化物的铸铁更高。

高含铬量的白口铸铁具有较好的耐磨料磨损性、韧性以及耐腐蚀性，为此已开发了一系列的工业用w(Cr)为12%~18%的马氏体或奥氏体白口铸铁。由于这些铸铁里的大部分铬均以碳化物的形式而存在，铬在遏制共析体转化成珠光体方面的效果远不如钼、镍、锰或铜，故它在铸铁里对淬硬性的作用也不如它在钢里的大。马氏体白口铸铁通常含有一种或多种的钼、镍、锰和铜元素，用于产生所要求的淬硬性。当从高于上相变温度冷却时，这些元素都能保证马氏体的生成，即其铸件无论是在铸型里面还是在后续的热处理过程里进行冷却。

镍。镍几乎全部都分布在奥氏体相或它的转化产物里。镍能促成石墨的生成，并且在白口铸铁和激冷铸铁里常通过在成分上每三份镍加上一份铬的平衡取得这种效果。

作为工业合金白口铸铁的Ni-Hard家族中的一员(等级Ⅳ的(Ni Hard)镍铬冷硬铸铁，即按ASTM A532为大家所知道的等级Ⅰ，型号D，Ni-HiCr)，它含(质量分数)有1.0%~2.2%Si、5%~7%Ni和7%~11%Cr。作为铸造状态，它是一种M_7C_3共晶碳化物存在于马氏体基体中的组织。如果还有残留奥氏体存在，则合金的马氏体含量和硬度都可通过冷处理或再度奥氏体化并空冷而得到提高。等级Ⅳ的(Ni Hard)镍铬冷硬铸铁常规定为泵和其他用于处理研磨膏的材料使用，因为它组合了相对较好的强度、韧性和耐磨料磨损性。

为满足对最佳耐腐蚀性或耐热性的要求，镍的添加量需高于12%(质量分数)。高镍灰铸铁或球墨铸铁通常含有1%~6%(质量分数)的铬，还能含高达10%(质量分数)的铜。这些元素与镍一起来提高耐腐蚀性和耐锈蚀性，特别是在高温条件下。所有w(Ni)高于18%的各种铸铁都是全奥氏体的。

铜。其中等含量可用于在低铬和高铬的马氏体白口铸铁中遏制珠光体的形成。与镍相比，其作用相对缓和，而且因为铜在奥氏体中的有限溶解度，铜的添加量也许应当限于不到2.5%。这个限度表示铜不能在镍铬冷硬铸铁中完全替代镍。

在一些高镍灰铸铁和球墨铸铁里，铜可以按接近3%~10%(质量分数)的含量使用，专用于腐蚀和高温的用途。因此铜能增强耐腐蚀性，特别是抗氧化或锈蚀的能力。

钼。在激冷铸铁和白口铸铁成分中，钼分布在共晶碳化物和基体之间。在石墨铸铁中，它的功能为提高硬化的深度，改善耐腐蚀性和高温强度。

在激冷铸铁的成分，中钼的加入能适度地增加激冷的深度(它的效果约为铬的1/3，见图2.4-21d)。在

激冷铸铁里加入少量钼（w(Mo)为0.25%～0.75%）的主要目的是为了提高激冷面的耐散裂、耐点蚀、耐剥落和耐热裂的能力。钼还能提高珠光体基体的硬度和韧性。

当因超耐磨料磨损性的需要而用马氏体白口铸铁时，加入0.5%～3.0%钼，并且结合与铜、铬、镍、或铬加上镍的使用，将能有效地遏制珠光体的形成以及其他高温转化物的形成。

钒。这是一种强有力的碳化物稳定剂，并能增加激冷深度。其增加激冷深度的幅度取决于钒的含量和铸铁的成分，还有截面的大小和铸件的状态。钒在薄截面里的强烈激冷效应能通过加入镍或铜，或通过大大增加碳、硅或其两者而得到均衡。除了碳化物的稳定作用外，0.10%～0.50%（质量分数）钒还可细化激冷的组织，并使粗大的柱状晶粒最小化。

由于其形成碳化物的强烈趋势，钒很少用于灰铸铁和球墨铸铁的腐蚀或高温的用途。

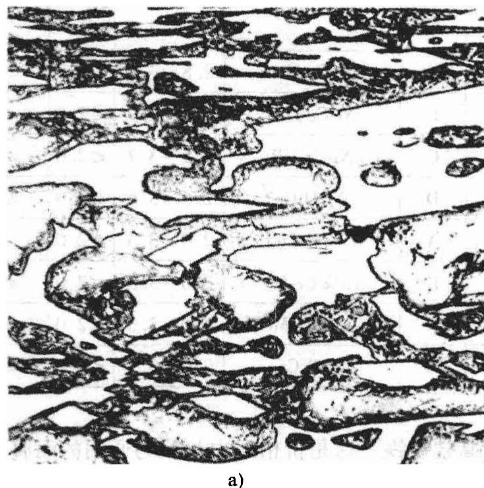
耐磨料磨损铸铁

高合金白口铸铁能用于诸如破碎、碾磨和材料的搬运的一些耐磨料磨损用途。它们通常含有相当量的铬，用于稳定碳化物，并形成比碳化铁更硬的碳化铬。最大硬度可见于完全马氏体基体。这种铁可以分为三类：

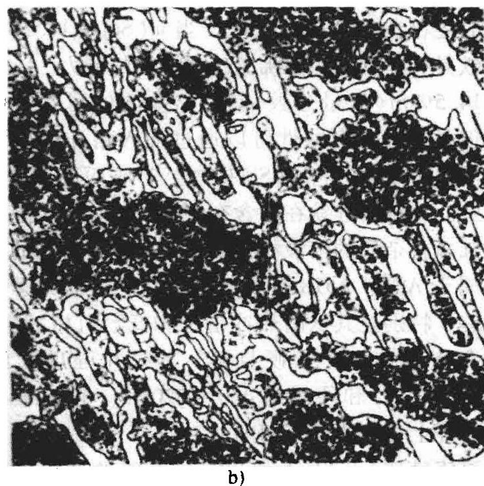
- 含有3%～5% Ni和1%～4% Cr（质量分数）的镍-铬铸铁，即其商业用名镍铬冷硬铸铁（Ni-Hard）。这些是相对价廉的铸铁，主要用于采矿业里的球磨机衬板和磨球。它们也可以用于泥浆泵和破碎机压板。如果需要适度的抗冲击性，就可以使用低碳型的这种铸铁。
- 含有11%～23% Cr和高达3% Mo（质量分数）的铬-钼铸铁，里面还含有一些镍和铜。这类合金能提供所有白口铸铁所具有韧性和耐磨料磨损性的最佳组合，应用于硬岩石的采矿设备、砂浆泵、煤磨机和砖模。
- 含有25%～28% Cr（质量分数）的高铬铸铁，再添加高至1.5%（质量分数）的镍或钼。高铬含量不仅能提供高硬度还具有耐腐蚀性，这种铸铁可用于传送煤粉的泵，也可用于含有氯化物的环境。

其硬度也会随含碳量的增加而提高，并且硅提高生成马氏体（一种因快速淬火而形成的非常硬的基体组织）的温度，使得马氏体合金白口铸铁的热处理变得容易。然而由于较高的碳、硅含量趋向于促使凝固过程中石墨的形成，故它们必须与如铬的一些合金元素结合使用，以此稳定碳化物。

ASTM A532技术规范包括能用于耐擦伤用途里的白口铸铁的牌号。表2.4-23所示就是这种合金所要求的化学成分。根据所采用的热处理，可以达到的硬度范围为41～59HRC。图2.4-22所示是这种合金的典型显微组织。



a)



b)

图2.4-22 高铬白口铸铁的显微组织。在高合金白口铸铁里常见到的大量碳化物也就是图中的白色组分。两张照片均为500×

a）铸造的奥氏体马氏体基体显微组织

b）热处理的马氏体显微组织

耐腐蚀铸铁

在灰铸铁里，加入适量的单独或组合的镍、铬和铜，或超过3%（质量分数）硅可以使其耐腐蚀性得到增强。表2.4-22中列出了一些使用较为广泛的耐腐蚀铸铁的化学成分。

所有的铸铁一般都含有高达3%（质量分数）的硅，超过此含量的就可将其认为是合金元素。在氧化

的条件下，例如暴露在氧化酸里，它会促使表面形成强保护膜。相对少量的钼和/或铬可以与高硅结合起来加入。在灰铸铁里，加入镍能提高其耐还原酸腐蚀的能力，还能提供很强的耐苛性碱腐蚀的能力。铬有助于形成防止氧化酸腐蚀的保护性氧化物，尽管它在还原性条件下益处不大。铜对于耐硫酸腐蚀的效果较小。

表2.4-23　ASTM A532中耐磨料磨损白口铸铁的成分

等级	型号	代　号	化学成分(质量分数,%)								
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
I	A	Ni-Cr-HiC	2.8~3.6	≤2.0	≤0.8	3.3~5.0	1.4~4.0	≤1.0	—	≤0.3	≤1.5
I	B	Ni-Cr-LoC	2.4~3.0	≤2.0	≤0.8	3.3~5.0	1.4~4.0	≤1.0	—	≤0.3	≤1.5
I	C	Ni-Cr-GB	2.5~3.7	≤2.0	≤0.8	≤4.0	1.0~2.5	≤1.0	—	≤0.3	≤1.5
I	D	Ni-HiCr	2.5~3.6	≤2.0	≤2.0	4.5~7.0	7.0~11.0	≤1.5	—	≤1.0	≤1.5
Ⅱ	A	12%Cr	2.0~3.3	≤2.0	≤1.5	≤2.5	11.0~14.0	≤3.0	≤1.2	≤1.0	≤0.06
Ⅱ	B	15%Cr-Mo	2.0~3.3	≤2.0	≤1.5	≤2.5	14.0~18.0	≤3.0	≤1.2	≤1.0	≤0.06
Ⅱ	D	20%Cr-Mo	2.0~3.3	≤2.0	1.0~2.2	≤2.5	18.0~23.0	≤3.0	≤1.2	≤1.0	≤0.06
Ⅲ	A	25%Cr	2.0~3.3	≤2.0	≤1.5	≤2.5	23.0~30.0	≤3.0	≤1.2	≤1.0	≤0.06

高硅铸铁。这是价格适中和最为通用的耐腐蚀合金。它们广泛地应用于化工厂腐蚀性介质的储运，甚至同时还存在着磨损的工况。当 w(Si)≥14.2%时，这种铁具有非常高的耐沸腾硫酸腐蚀的能力。

14.5%Si(质量分数)铸铁对盐酸的耐腐蚀性较差，但是这种耐腐蚀性可以通过加入铬和钼得到改善，而且可以通过将 w(Si)提高至17%而得到进一步的加强。含铬的硅铁在与含有铜盐、“游离”湿氯或其他强氧化杂质的溶液相接触时，是非常有用的。

属于ASTM A518技术规范的高硅铁的力学性能比较差，特别是其低耐热冲击性和低耐机械冲击性。这种合金一般都非常硬且脆，其抗拉强度大约为110MPa(16ksi)和硬度为480~520HB。它们难以铸造，实际上也无法进行切削加工。

高铬铸铁。w(Cr)为40%至35%的高铬铸铁能很好地在氧化酸里，特别是硝酸中应用，但是在还原酸里就没有耐腐蚀性。在氧化的条件下、在许多盐溶液里、在有机酸溶液里以及在海水或工业气氛中，这些铸铁都能在弱酸里得到可靠的应用。

耐热铸铁

耐热铸铁基本上是铁、碳和硅的合金，并以单一或组合方式加入一定量的合金元素，主要为铬、镍、钼、铝和硅(w(Si)>3%)，由此可显著提高其高温性能。硅和铬能形成表面氧化物薄层，以此防止氧化气氛的渗透，从而提高其抗严重锈蚀的能力。这两种元素都降低其高温韧性。钼也能提高高温强度。铝的加入可以减少晶粒的生长和锈蚀的发生，但是会给室温下的力学性能造成负面影响。表2.4-22列出了一些广泛应用的耐热铸铁(包括灰铸铁和球墨铸铁)的化学成分范围，它们都适用于高温。

体积增大。这指的是一些铸铁长时间地处于高温下或者经反复地周期性加热和冷却之后，使体积产生的永久性增大。这是由于在相变温度中伴随着石墨化、膨胀和收缩而发生的膨胀，以及铸铁内部发生氧化所引起的。气体能渗透石墨片上的热铸铁表面，并且使石墨以及铁和硅氧化。由于热应力和相变应力的作用，伴随着反复加热和冷却经过相变温度的范围，而因此产生细微的裂纹或称为“碎裂”。

低于接近3.5%的硅含量会因加速石墨化而提高体积增大的速度，w(Si)≥4%则延缓这种增大。

当≥450℃(850℉)时，碳化物的稳定化合金元素(尤其是铬)能有效地降低灰铸铁的体积增大。在<400℃(750℉)时，则不会有体积增大的问题，除非在过热蒸汽的压力下，在310℃(600℉)形成晶粒粗大的铸铁。即使少量的铬、钼和钒，也能在较高的温度下使体积增大明显减小。

锈蚀。除了会造成体积增大的内部氧化外，非合金灰铸铁经过足够高的温度中暴露后会产生表面锈蚀。

硅、铬和铝能通过形成很薄的氧化物表层来阻隔氧化气氛，以此提高抗锈蚀的能力。可惜的是这些元素倾向于降低韧性和耐热冲击性。镍的存在能改善大部分含铬合金的耐锈蚀性，而且更重要的是提高它们在高温下的韧性和强度。碳在700℃(1300℉)时，由于其脱碳的机制和一氧化碳和二氧化碳的逸出而造成

一些破坏性的影响。当这些气体从金属表面逸出时，使得氧化物保护层的生成受到阻碍，而在锈蚀里发生裂纹和气泡。

图 2.4-23 所示是不同硅-铬铸铁在无硫的氧化气氛中，能够在仅发生一些轻微或无足轻重的锈蚀条件下使用的温度。在某些应用里，它可以承受较大的锈蚀速度，于是常有可能在更高的温度中使用。

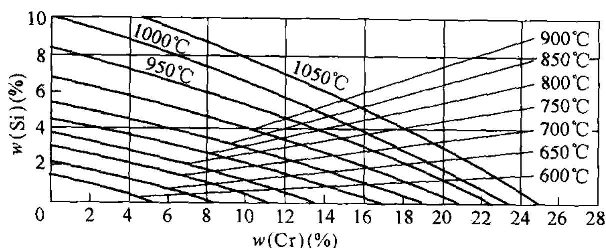


图 2.4-23 硅-铬铸铁的硅、铬含量与其耐锈蚀性的关系。所示温度为不同的硅-铬铸铁在无硫的氧化气氛中使用时，只发生一些轻微或不显著的锈蚀的温度

高镍铸铁。含有 18%~36% Ni、高达 7% Cu 和 1.75%~4% Cr(质量分数)的奥氏体铸铁能应用于耐热和耐腐蚀的用途。就像耐蚀高镍铸铁(即 Ni-Resist 或尼瑞西斯特铸铁)，这类铸铁能在高达 815℃(1500℉)并大部分氧化的气氛中表现出良好的耐高温锈蚀性，以及抗体积增大的能力；并且在高达 530℃(990℉)的蒸汽里应用，仍具有良好的性能，还能在高达 400℃(750℉)的温度里储运酸腐性的气体和液体。如果在气氛中有相当含量的硫，则其最高使用温度为 540℃(1000℉)。奥氏体铸铁能用于高达 950℃(1740℉)的温度里。奥氏体铸铁的优点就在于其远远高于其他耐热合金铸铁的韧性和耐热冲击性，尽管它们的强度相当低。

高镍球墨铸铁比相应的灰铸铁有高得多的强度和韧性。高镍球墨铸铁能实现 400~470MPa(58~68ksi)的抗拉强度、200~275MPa(30~40ksi)的屈服强度以及 10%~40% 的伸长率。表 2.4-24 和表 2.4-25 分别列出了奥氏体球墨铸铁的成分、性能。

表 2.4-24 ASTM A439 中奥氏体球墨铸铁的成分

型号	UNS 编号	成分(质量分数,%)					
		TC①	Si	Mn	P	Ni	Cr
D-2	F43000	≤3.00	1.50~3.00	0.70~1.25	≤0.08	18.0~22.0	1.75~2.75
D-2b	F43001	≤3.00	1.50~3.00	0.70~1.25	≤0.08	18.0~22.0	2.75~4.00
D-2c	F43002	≤2.90	1.00~3.00	1.80~2.40	≤0.08	21.0~24.0	≤0.50
D-3	F43003	≤2.60	1.00~2.80	≤1.00	≤0.08	28.0~32.0	2.50~3.50
D-3a	F43004	≤2.60	1.00~2.80	≤1.00	≤0.08	28.0~32.0	1.00~1.50
D-4	F43005	≤2.60	5.00~6.00	≤1.00	≤0.08	28.0~32.0	4.50~5.50
D-5	F43006	≤2.60	1.00~2.80	≤1.00	≤0.08	34.0~36.0	≤1.00
D-5b	F43007	≤2.40	1.00~2.80	≤1.00	≤0.08	34.0~36.0	2.00~3.00
D-5S	—	≤2.30	4.9~5.5	≤1.00	≤0.08	34.0~37.0	1.75~2.25

①总含碳量。

表 2.4-25 ASTM A439 中球形石墨奥氏体铸铁的一般性力学性能

型 号	最小抗拉强度		最小屈服强度		最小伸长率①(%)	硬度 HB
	MPa	ksi	MPa	ksi		
D-2	400	58	205	30	8	139~202
D-2b	400	58	205	30	7	148~211
D-3	380	55	205	30	6	139~202
D-4	415	60	—	—	—	202~273
D5	380	55	205	30	20	130~185

①50mm(2in)。

高硅铸铁。4%~6% Si（质量分数）的石墨合金铸铁在高温用途里有很好的使用性能和低廉的成本。这种铸铁无论是灰铸铁还是球墨铸铁都具有良好的抗氧化性和稳定的铁素体基体组织，而且不需经受高达900℃（1650℉）的相变。

虽然高硅铸铁在室温下里十分脆，但是超过260℃（500℉）时它还是具有一定的韧性。而其球墨铸铁具有较高的强度和塑性，可应用于较为严酷的工况里。经过钼合金化（w(Mo)≤2.5%）的高硅球墨铸铁的抗拉强度和屈服强度，将得到很大的提高。

高铝铸铁。据称，所有含有6%~7% Al、18%~25% Al或12%~25% Cr+4%~16% Al（质量分数）的铝铸铁，都比包括高硅类的一些其他合金铸铁具有较佳的耐锈蚀性。但是，这些高铝铸铁却因为其脆性和很差的铸造性，而在工业上并不太常用。

精选参考文献

- Elevated Temperature Properties of Cast Irons, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 409–427.
- R.B. Gundlach, Alloy Cast Irons, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 85–104.
- Metallurgy and Properties of High-Alloy Graphitic Irons, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 123–130.
- Metallurgy and Properties of High-Alloy White Irons, *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1996, p 107–122.
- White and High Alloy Irons, *Iron Castings Handbook*, C.F. Walton and T.J. Opar, Ed., Iron Castings Society, 1981, p 399–461.

第5章　铁质粉末冶金材料

本章内容由《ASM手册》，第1卷性能和选用：铁、钢和高性能合金，1990，800～821页和《ASM手册》，第7卷：粉末冶金技术及应用，1984，79～99页的内容精简而成。其他有关内容还可参阅本章末所列的精选参考文献。

第1节　压制和烧结零件

铁粉最为广泛地应用于制造粉末冶金（P/M）的结构性零件。全铁或铁质（铁类的）粉末中将近90%都用于P/M零件，而且汽车工业是其应用的大户。其他的重要用途包括商务设备、草坪和花园机械、动力工具、锁具和各种器具。

铁粉用于非结构用途的最主要单独使用就是用于电弧焊的涂层和管形电极。其他的非结构应用领域包括药品和食品添加剂（美国人在富铁的麦片和面包里每年要使用二百万磅的铁粉）。作为墨粉的铁粉还用于静电复印机。

本节将综述采用压制和烧结技术制造的低密度到中密度的铁和低合金钢零件（本章的后面将叙述用粉末锻压和注射成型技术制造的高密度铁质零件）。压制和烧结的粉末冶金P/M零件的制造工艺包括：①粉末的生产、冷压坯块和烧结；②粉末的生产、温压坯块和烧结。使用冷压和烧结，零件做成的密度为6.4～7.1g/cm³，即大概为理论密度的80%～90%（铁或低碳钢的理论密度约为7.87g/cm³）。使用温压坯块能使密度达到7.2g/cm³至略超过7.4g/cm³（约为理论密度的95%）。高温烧结也能制造出较高的密度。第二种工艺，如渗透或二次压制/二次烧结可以用于提高到接近用高密度工艺所能取得的密度。然而，如图2.5-1所示，用第二种工艺或高密度工艺需要较高的成本。而且如后所述，较高的密度与力学性能的改善有关。

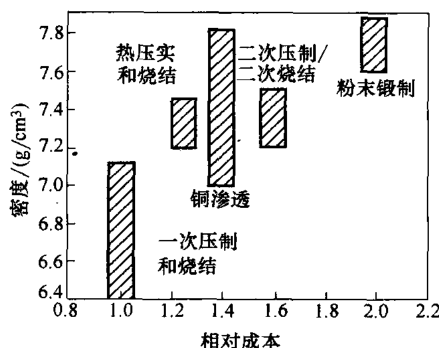


图2.5-1　几种P/M工艺的相对成本与其密度关系。引自Hoeganaes公司

粉末的制造

有多种工艺可以在工业上用于生产铁质粉末。其中最重要的是氧化物直接还原法和液态金属雾化法。铁质粉末还可以通过羰基蒸汽冶金工艺（羰基铁）和电解（电解铁）进行生产。

氧化物直接还原法

工业上可用的氧化物直接还原工艺有两种：用碳还原工艺（Hoeganaes工艺）和用氢还原工艺（Pyron工艺）。还原铁粉一般用于低应力或中应力的用途。

碳还原工艺。这是一种通过直接还原磁铁（Fe_3O_4）矿生产得到海绵状铁。将磁铁矿放在旋转干燥机里进行干燥，再用磁选机碾碎和清洗。然后把经清洗的矿石与经粉碎的石灰和焦炭混料一起装入碳化硅管里，在隧道式的窑里加热到1260℃（2300℉）并保持24～40h。铁矿石被焦炭产生的一氧化碳还原。

出窑后，结成直径为25mm（1in）的海绵铁饼块，经过研磨、过筛和磁选的一系列步骤加工成为颗粒大小分布符合要求的粉末。接着为了降低碳和氧的含量，将经过清洗的粉末装入钢带炉里在870℃（1600℉）的游离氨的气氛里进行退火，同时也是为了消除在研磨过程中产生的应变硬化。最后得到的粉末呈不规则形状并且是高度疏松状的，如图2.5-2所示。

氢还原工艺。该工艺利用在氢气氛中还原所选的氧化铁来生产铁粉。在这种工艺中，将轧制氧化皮经碾碎、磁选和过筛的流程，然后在空气中将轧制氧化皮预热使全部氧化物都转化为赤铁矿（Fe_2O_3），因为赤铁矿比磁铁矿（Fe_3O_4）更容易还原。再让氧化物在带式炉里约980℃（1800℉）的氢气氛中还原，然后将还原铁磨细、过筛和调和达到其技术标准。对于氢还原工艺，并没有必要进行退火步骤。

氢还原铁粉具有很细的孔隙性和海绵状的显微组

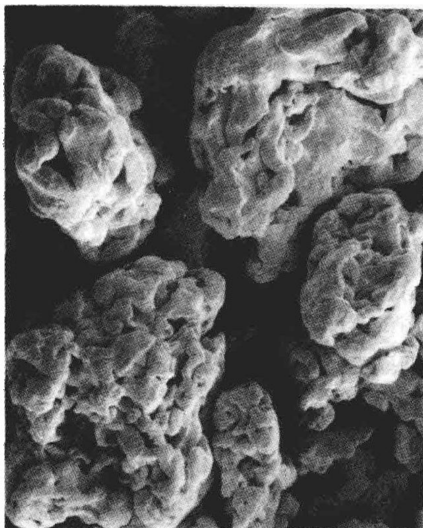


图2.5-2　碳还原铁矿粉的扫描电镜照片，180×

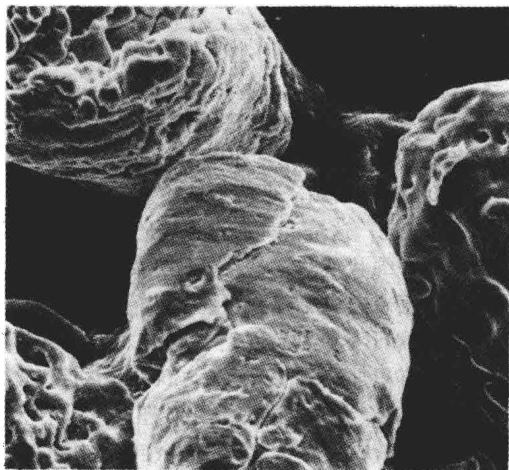


图2.5-3　氢还原轧制氧化皮的扫描电镜照片750

织(见图2.5-3)。氢还原铁粉颗粒内部组织里的孔隙比海绵碳还原铁粉颗粒更细，因为后者在较高的温度里长时间的还原处理会使孔隙粗化。

液态金属的雾化法

工业化生产铁质粉末的另一种主要方法就是利用水或惰性气体的液态金属雾化法。一般来说，气体喷雾用于高合金材料(例如超合金和工具钢)，这里不作进一步叙述。两种铁-碳以及一些预制合金粉末都能用水喷雾进行生产。它们适用于较高应力、较高性能的用途。

对于用低碳铁通过水雾化生产铁粉，碳钢液(一般 w(C)为0.1%)直接或经由浇道进入中间包(见图2.5-4)，中间包主要作为熔池用于控制金属熔液从中间包的出口流出。位于中间包底部的出口控制着金属流的形状和大小，并且引导其通过雾化的喷嘴系统，在里面用高速雾化介质将金属流分散成很细的液滴。金属液滴随即沉入装有水的雾化桶的桶底，并冷却和凝固(淬火)。

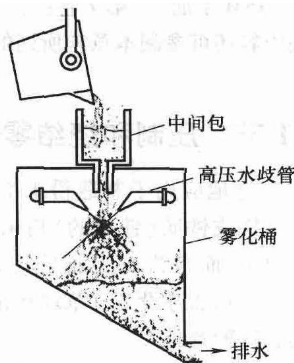


图2.5-4　水雾化工艺的草图

经过磁选、沥水和干燥，粉末在带式炉里加热至800~1000℃(1470~1830℉)左右。炉子里的气氛为氢或游离氨。在此过程中氧的含量低于0.2%，碳的含量降低到大约0.01%。同时，粉末通过退火得到软化。烧结块经锤式研磨使烧结饼块恢复到原来的雾化颗粒的大小分布，并使最后的粉末具有中等程度的加工硬化。过筛和混料则按照标准作业方法进行。

这种方法生产的铁粉(包括预制合金钢粉末)比所有其他方法都多。这种粉末的高压缩性和高纯度是其得到广泛应用的主要原因。高压缩性或高压制-烧结的密度是许多要求超高力学性能的用途所需要的。高纯度则是粉末锻压及其他全密度工艺所不可缺少的，因为即使少量的氧化物也会影响其动力性能。图2.5-5所示是水雾化的钢粉末的不规则形状，所示颗粒形状在这类粉末中具有代表性。

也可以使用高含碳量的原料通过水雾化生产铁粉。在其中一种工艺里，高含碳量钢(w(C)约为3.5%)经水雾化成粒状“铁丸”，再通过球磨达到粉末的大小。将含有碳的经磨制铁丸与含有氧的经磨制的轧制钢屑(氧化铁)相混合。碳和氧在带式炉里的烧结温度中化合成为一氧化碳气体(形成还原气氛)，于是留下的就是纯铁块。再将纯铁块碾磨到粉末的大小并进一步的细化处理。

还有一种工艺是以高碳生铁(w(C)为3.3~3.8%)作为其起始原料，并利用水雾化与粒状热金属部分氧化相结合。之后，将经过粗碾的铁粒球磨成粉末，再经过脱碳/退火。其还原铁饼块还要经过粉

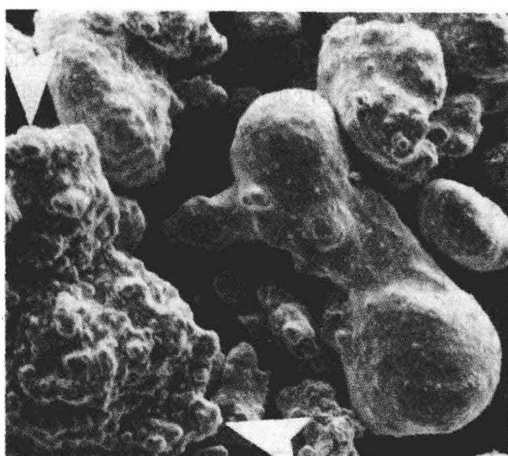


图2.5-5　水雾化铁颗粒的扫描电镜照片，呈现出相当程度的不规则性和表面粗糙度(注意箭头所指的颗粒)。190×

碎、研磨和混料的进一步精细加工。

羰基铁和电解铁

羰基铁粉末。它是通过五羰基铁 $Fe(CO)_5$ 的热分解而生产的。用羰基技术生产的高纯度铁一般都是呈球形的(见图2.5-6)，并且其大小范围为2～20μm，故适宜于制造注模零件(通常用于冷模压实的粉末大小范围为50～150μm)。由于其高表面积和细颗粒大小，而使这种材料能烧结成近似于全密度并有很大的收缩度。

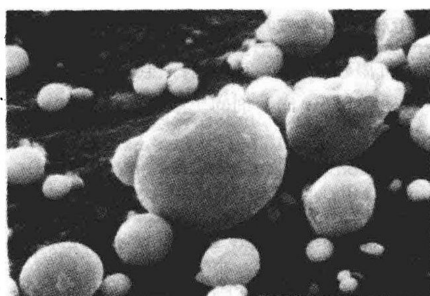


图2.5-6　羰基铁粉的扫描电镜照片。3000×

电解铁粉末。它是利用盐酸盐或硫酸盐的电解槽(电解液)使铁电镀于不锈钢的阴极表面而产生的。随后将脆性的铁沉积物从阴极剥离下来，在球磨机上碾碎。最后得到的颗粒呈现不规则的形状(片形)并有很粗糙的表面(见图2.5-7)。高纯度的电解铁适用作软磁零件、复印机的墨粉盒里的铁粉以及食品添加剂。

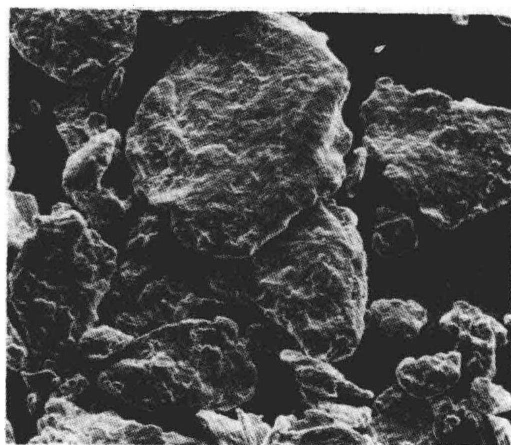


图2.5-7　电解铁粉的扫描电镜照片。注意这种粉末的片状特征。190×

压实与烧结

混合或调和。粉末在固化之前，先进行混合和调和。在铁质粉里加入润滑剂和石墨。润滑剂，例如合成蜡或硬脂酸，不仅是为了使模具的摩擦磨损降至最小，也是为了减小颗粒间的摩擦，以使颗粒被压得更紧密，从而在较低的成型压力范围内形成较高的密度。加入的润滑剂量取决许多因素，包括金属粉末的成分、工装类型、压实密度和零件的复杂性。加入量一般从0.5%～1.5%（质量分数）。

加入石墨是为了提供氧化物还原用的碳，并达到烧结零件的最终含碳量要求。如果要求提高强度，还要在最后的混合过程中加入少量的合金添加剂，如镍和铜。粉末生产商还会提供粘结混合剂，里面所含的0.125%聚合物可使添加剂粘附在铁粉上。这可以防止偏集、增加流动速度和减少零件之间的尺寸差异(见下面有关"温压实"的讨论)。

冷压实。粉末压实有几个重要的作用：将粉末固结成所要求的形状——坯块，它必须有足够的强度，以便经受后续的处置；压实能控制最终成品的孔隙度的数量和类型；零件的最终尺寸在很大程度上取决于压实，在烧结过程中尺寸要发生一定的变化。

在多种压实的方法中，在室温里，用密闭模压力压实是生产铁质粉末冶金(P/M)零件最常用的方法。最常见的P/M零件以范围约为415～700MPa[30～50tsi(60～100ksi)]的压力压制而成。具体施加的压力主要依据零件所要求的密度/强度。

压实也可以用冷等静压进行压制。其压力范围通常为310～415MPa(45～60ksi)。一般来说，冷等静压压制在铁质P/M零件上的使用十分有限，因为其

生产率很低。这种方法比较多地用于难以压制的材料和高度复杂的形状。

压实能将疏松的粉末固结和致密成为一种叫做"未烧结坯块"的形状。借助常规的技术，坯块一旦从模型中推出，就有了其成品的大小和形状。它还要为了随后的搬动和运进烧结炉里而具备足够的强度（称烧结前强度）。

温压实。这是借助一种单一的压实工艺生产出高密度的铁质 P/M 零件的方法。其方法是在压实的工艺流程里，使用经加热的工装和粉末。粉末和工装一般加热到 130～150℃（260～300℉）。为了使粉末预混料能在上述温度里操作，已有一种专用的润滑剂系统能提供比普通的润滑剂更低的型模注射力。其润滑系统配有聚合粘结剂系统，用于制约偏集的发生，并能增强粉末预混料的流动特性。采用温压实技术固结零件，在烧结前的密度可以比用常规方法制造的材料（一次压制/一次烧结）提高 0.1～0.25g/cm^3。表 2.5-1 列出了对温压实和冷压实的 P/M 零件的烧结前性能的比较。烧结前强度的这种提高具有诸多优点，如减少因烧结前的搬运造成的表面碰伤和开裂，并使复合多级零件的压实块避免产生裂纹。此外，较高的烧结前强度为 P/M 零件在烧结前状态下的切削加工提供了可能性。这种能力对于应用于烧结后获得高硬度的高性能合金系统是至关重要的。

表 2.5-1 工艺方法对坯块烧结前的性能的影响

基础材料	工艺方法	压实压力		烧结前密度	烧结前强度		型模注射力峰值	
		MPa	tsi	g/cm^3	MPa	psi	MPa	tsi
安科斯蒂尔（Ancorsteel）85HP①	温压实	415	30	7.14	23.2	3370	29.6	2.15
		550	40	7.31	25.4	3685	33.5	2.43
		700	50	7.37	24.7	3580	32.0	2.32
	冷压实	415	30	7.00	9.9	1430	37.2	2.70
		550	40	7.19	12.2	1770	50.7	3.68
		700	50	7.29	13.4	1950	53.8	3.90
迪斯特劳埃（Distaloy）4800A②	温压实	415	30	7.07	28.3	4100	27.4	1.99
		550	40	7.29	30.6	4445	31.7	2.30
		700	50	7.36	31.1	4515	32.3	2.37
	冷压实	415	30	6.93	12.2	1770	37.2	2.70
		550	40	7.15	15.0	2170	48.5	3.52
		700	50	7.26	16.9	2450	52.0	3.77

①安科斯蒂尔（Ancorsteel）85HP 是一种含有 2.0% Ni、0.85% Mo、0.4% 石墨和 0.6% 润滑剂的预制合金钢粉末。 ②迪斯特劳埃（Distaloy）4800A 是一种含有 4% Ni、1.5% Cu、0.50% Mo、0.5% 石墨和 0.6% 润滑剂的扩散合金钢粉末。

引自：Hoeganaes Corporation。

如图 2.5-1 所示，温压实还能使 P/M 制造商通过一次压制和一次烧结得到的 P/M 零件密度高达 7.4g/cm^3 左右，大大高于冷压和烧结的 P/M 零件密度。传统的提高密度和改善力学性能的方法包括二次压制/二次烧结、铜渗透、粉末锻压或高温烧结，但是与一次压制/一次烧结的温压实相比，所有这些方法的成本都很高。

尽管温压实适用于所有的铁质材料系统，但是当结合用高性能成分（如扩散合金钢（下面还会详述）或钼预制合金钢）时，就会产生最大效益。使用这些成分能获得超过 7.25g/cm^3 的密度，由此最后得到的力学性能足以与锻钢件和球墨铸铁铸件的相媲美。

烧结。这是 P/M 工艺中最为复杂的过程之一。对粉末冶金而言，烧结的一般定义为粉末颗粒在热的作用下形成冶金学粘结并致密化的过程。在铁质 P/M 零件的烧结过程中，会特别发生以下反应：

- 坯块中粉末金属颗粒之间的冶金学粘结是由其机械连接转变而来的。
- 粉末坯块中的金属氧化物同与之调和的石墨粉末碳发生化学反应，金属氧化物因此被还原。
- P/M 坯块所要求的最终含碳量是通过石墨粉末碳的扩散而达到的。
- P/M 坯块的致密化是在烧结中形成的。其致密化的程度取决于烧结参数和所含的合金。一般来

说，较高的温度和较长的时间会促使烧结零件较大的致密化。

用于烧结的设备和技术也是多种多样的，必须要有一种在适当的保护气氛里加热零件的方法以及一种控制工艺变量的方法。烧结中加热和冷却的速度、时间和温度以及气氛的成分都是最为关键的变量。其成品零件的尺寸受制于烧结的条件、压实工艺和粉末本身的性质。在铁质金属的烧结过程中，气氛起着一种双重作用：既保护金属不被氧化，又有助于控制零件中的含碳量，尤其是表面含碳量。工业用铁质粉末包括预制合金钢粉末，一般都含有非常少量的碳。成品零件里的含碳量可以用混合在粉末里的石墨量和烧结气氛中渗碳气体的渗碳能力进行调节。特别在合金钢里，从烧结温度的冷却速度就决定了奥氏体分解最后形成何种显微组分，但是足够低的冷却速度一般可以生成铁素体和珠光体的显微组织。

大部分的铁质零件都是在网带传送炉中以1105～1120℃(2020～2050℉)的温度里加热的。普通使用的炉内气氛包含游离氨(75%体积 H_2、25%体积 N_2)、吸热型气体(40%体积 N_2、40%体积 H_2、20%体积 CO以及少量的水、二氧化碳和甲烷)和氮基气氛(例如氮气与10%的游离氨)。真空适用于一些高温烧结的用途。零件经由一个760～870℃(1400～1600℉)的去除润滑油区域，然后在高温中保留大约15～25min。这种炉子能每小时生产90～360kg(200～800lb)的零件。这种炉子经过改进可增加预热区，在那里利用气体火焰快速加热形成一种氧化的工况条件，以此防止零件产生气孔和积炭。其他的炉子则迫使气氛气体在其出料口作为冷却剂再循环。因此能形成较细的珠光体间距，甚至生成一些马氏体和贝氏体，以此提高强度。

为了达到较高的温度和提高韧性，目前可将零件放进温度为1230～1315℃(2250～2400℉)的大型步进梁式加热炉里进行烧结。其生产率可达到900kg/h(2000lb/h)，而且能进行很好的尺寸控制、减小力学性能值的离散性，并提高其平均值。

二次加工工艺。对于许多用途，通过压实(无论冷或温)和烧结得到的P/M零件，就能满足所有的性能要求。但在还有一些用途，对于零件的功能性要求(力学性能、表面粗糙度和/或尺寸公差)是一次压实和烧结零件所无法达到的，于是需要一次或多次的再加工。一些常用的再加工为：

- 重复压：以此提高密度以及强度和塑性；是否伴之以再次烧结可视情况而定。通常也称之为二次压制；
- 精压：提高尺寸精度，相对于压实压力的方向，通常沿其径向方向进行精压；
- 压型：以期获得一定的表面形状(不要与重复压或精压相混淆)；
- 切削：获得通过压实无法获得的形状，如攻螺纹孔或切割底槽；
- 渗透：增加密度和减少孔隙；
- 热处理：提高硬度和强度；
- 连接：烧结粘合、叠层、硬钎焊、渗透和焊接；
- 精整加工：包括去毛刺、抛光、浸渍和电镀。

当P/M零件的用途要求较高的强度、韧性或硬度时，可以通过渗透、热处理或二次机械成形如冷(室温)再压等方法提高或改善这些性能。后文将会讨论这些再加工对性能的影响。

铁质P/M材料的代号

粉末冶金材料通常是用它们所依据的生产技术规范或标准规定代号的。类似的标准及其颁布单位如下所列：

- 金属粉末工业联合会：粉末冶金结构件的材料标准，MPIF标准35(Metal Powder Industries Federation:MPIF Standard 35,Material Standards for P/M Structure Parts)；
- 美国材料试验学会：ASTM B783,《铁质粉末冶金结构件的标准规范》(ASTM: ASTM B 783, "Standard Specification for Material for Ferrous Powder Metallurgy Structural Parts")；
- 国际标准化组织：ISO 5755—2《用于结构件的含碳和铜的一种或两种元素的烧结铁和烧结钢，技术规范第2部分，烧结金属材料》和ISO 5755—3《用于结构件的烧结合金和不锈钢，技术规范第3部分，烧结金属材料》(International Organization for Standardization (ISO): ISO 5755—2, "Sintered Metal Materials——Specifications Part 2, Sintered Iron and Sintered Steel Containing One or Both of the Elements Carbon and Copper, Used in Structural Parts"; and ISO 5755—3, "Sintered Metal Materials——Specification Part 3, Sintered Alloyed and Stainless Steels Used for Structural Parts")。

表2.5-2和表2.5-3分别列出了由MPIF Standard 35规定的铁质P/M零件/材料的成分要求和性能要求。有关下面所述各类材料的更加详细内容可以参阅该文件。

表 2.5-2 铁质 P/M 结构材料的化学成分

MPIF 代号	成分范围（最小至最大）[1]，（质量分数,%）				
	Fe	C	Cu	Ni	Mo
P/M 铁和碳钢					
F-0000	97.7 ~ 100	0 ~ 0.3	—	—	—
F-0005	97.4 ~ 99.7	0.3 ~ 0.6	—	—	—
F-0008	97.1 ~ 99.4	0.6 ~ 0.9	—	—	—
P/M 铁-铜和铜钢					
FC-0200	93.8 ~ 98.5	0.0 ~ 0.3	1.5 ~ 3.9	—	—
FC-0205	93.5 ~ 98.2	0.3 ~ 0.6	1.5 ~ 3.9	—	—
FC-0208	93.2 ~ 97.9	0.6 ~ 0.9	1.5 ~ 3.9	—	—
FC-0505	91.4 ~ 95.7	0.3 ~ 0.6	4.0 ~ 6.0	—	—
FC-0508	91.1 ~ 95.4	0.6 ~ 0.9	4.0 ~ 6.0	—	—
FC-0808	88.1 ~ 92.4	0.6 ~ 0.9	6.0 ~ 9.0	—	—
FC-1000	87.2 ~ 90.5	0.0 ~ 0.3	9.5 ~ 10.5	—	—
P/M 铁-镍和镍钢					
FN-0200	92.2 ~ 99.0	0.0 ~ 0.3	0.0 ~ 2.5	1.0 ~ 3.0	—
FN-0205	91.9 ~ 98.7	0.3 ~ 0.6	0.0 ~ 2.5	1.0 ~ 3.0	—
FN-0208	91.6 ~ 98.4	0.6 ~ 0.9	0.0 ~ 2.5	1.0 ~ 3.0	—
FN-0405	89.9 ~ 96.7	0.3 ~ 0.6	0.0 ~ 2.0	3.0 ~ 5.5	—
FN-0408	89.6 ~ 96.4	0.6 ~ 0.9	0.0 ~ 2.0	3.0 ~ 5.5	—
P/M 低-合金钢					
FL-4205	95.90 ~ 98.75	0.4 ~ 0.7	—	0.35 ~ 0.55	0.50 ~ 0.85
FL-4405	96.35 ~ 98.85	0.4 ~ 0.7	—	—	0.75 ~ 0.95
FL-4605	94.20 ~ 97.50	0.4 ~ 0.7	—	1.70 ~ 2.00	0.40 ~ 1.10
FLN-4205	93.95 ~ 97.76	0.4 ~ 0.7	—	1.35 ~ 2.50[2]	0.49 ~ 0.85
FLN2-4405	93.35 ~ 97.95	0.4 ~ 0.7	—	1.00 ~ 3.00	0.65 ~ 0.95
FLN4-4405	91.35 ~ 95.95	0.4 ~ 0.7	—	3.00 ~ 5.00	0.65 ~ 0.95
FLN6 ~ 4405	89.35 ~ 93.95	0.4 ~ 0.7	—	5.00 ~ 7.00	0.65 ~ 0.95
FLNC-4405	90.35 ~ 96.95	0.4 ~ 0.7	1.0 ~ 3.0	1.00 ~ 3.00	0.65 ~ 0.95
P/M 烧结-硬化钢					
FLN2-4408	93.15 ~ 97.75	0.6 ~ 0.9	—	1.00 ~ 3.00	0.65 ~ 0.95
FLN4-4408	91.15 ~ 95.75	0.6 ~ 0.9	—	3.00 ~ 5.00	0.65 ~ 0.95
FLN6-4408	89.15 ~ 93.75	0.6 ~ 0.9	—	5.00 ~ 7.00	0.65 ~ 0.95
FLN-4608	91.00 ~ 93.41	0.6 ~ 0.9	—	3.6 ~ 5.0[3]	0.39 ~ 1.10
FLC-4608	91.00 ~ 96.41	0.6 ~ 0.9	1.0 ~ 3.0	1.60 ~ 2.00	0.39 ~ 1.10
FLC-4908	92.40 ~ 95.10	0.6 ~ 0.9	1.0 ~ 3.0	—	1.30 ~ 1.70
FLNC-4408	90.15 ~ 96.75	0.6 ~ 0.9	1.0 ~ 3.0	1.00 ~ 3.00	0.65 ~ 0.95

（续）

MPIF 代号	成分范围（最小至最大）①，（质量分数,%）				
	Fe	C	Cu	Ni	Mo
P/M 扩散-合金钢					
FD-0205	93.15～96.45	0.3～0.6	1.3～1.7	1.55～1.95	0.4～0.6
FD-0208	92.85～96.15	0.6～0.9	1.3～1.7	1.55～1.95	0.4～0.6
FD-0405	90.70～94.40	0.3～0.6	1.3～1.7	3.60～4.40	0.4～0.6
FD-0408	90.40～94.10	0.6～0.9	1.3～1.7	3.60～4.40	0.4～0.6
P/M 铜-渗透铁和钢					
FX-1000	82.8～92.0	0.0～0.3	8.0～14.9	—	—
FX-1005	82.5～91.7	0.3～0.6	8.0～14.9	—	—
FX-1008	82.2～91.4	0.6～0.9	8.0～14.9	—	—
FX-2000	72.7～85.0	0.0～0.3	15.0～25.0	—	—
FX-2005	72.4～84.7	0.3～0.6	15.0～25.0	—	—
FX-2008	72.1～84.4	0.6～0.9	15.0～25.0	—	—

①MPIF 标准要求其他元素的总含量≤2.0%。 ②至少要作为单质粉末混入 1.0% Ni。 ③至少要作为单质粉末混入 2.0% Ni。

引自：MPIF 标准 35，1997 版。

表 2.5-3 铁质 P/M 材料的典型力学性能

材料代号	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm的伸长率（%）	弹性模量		横向断裂强度		冲击吸收功①		表观硬度②	疲劳强度③		密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	MPa	ksi	J	lbf·ft		MPa	ksi	
铁和碳钢															
F-000-10④	120	18	90	13	1.5	105	15.0	250	36	4	3.0	40HRF	46	7	6.1
F-0000-15④	170	25	120	18	2.5	120	17.5	340	50	8	6.0	60HRF	65	10	6.7
F-0000-20④	260	38	170	25	7.0	160	23.5	660	95	47	35.0	80HRF	99	14	7.3
F-0005-15④	170	24	120	18	<1.0	105	15.0	330	48	4	3.0	25HRB	60	9	6.1
F-0005-20④	220	32	160	23	1.0	115	16.5	440	64	5	4.0	40HRB	80	12	6.6
F-0005-25④	260	38	190	28	1.5	135	19.5	520	76	7	5.0	55HRB	100	15	6.9
F-0005-50HT⑤	410	60	⑥	⑥	<0.5	115	16.5	720	105	4	3.0	20HRC(58HRC)	160	23	6.6
F-0005-60HT⑤	480	70	⑥	⑥	<0.5	130	18.5	830	120	5	3.5	22HRC(58HRC)	190	27	6.8
F-0005-70HT⑤	550	80	⑥	⑥	<0.5	140	20.5	970	140	5	4.0	25HRC(58HRC)	220	32	7.0
F-0008-20④	200	29	170	25	<0.5	85	12.5	350	51	3	2.5	35HRB	80	11	5.8
F-0008-25④	240	35	210	30	<0.5	110	16.0	420	61	4	3.0	50HRB	100	14	6.2
F-0008-30④	290	42	240	35	<1.0	115	16.5	510	74	5	4.0	60HRB	120	17	6.6
F-0008-35④	390	57	260	40	1.0	140	20.5	690	100	7	5.0	70HRB	170	25	7.0
F-0008-55HT⑤	450	65	⑥	⑥	<0.5	115	16.5	690	100	4	3.0	22HRC(60HRC)	180	26	6.3

（续）

材料代号	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm的伸长率(%)	弹性模量		横向断裂强度		冲击吸收功①		表观硬度②	疲劳强度③		密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	MPa	ksi	J	lbf·ft		MPa	ksi	
铁和碳钢															
F-0008-65HT⑤	520	75	⑥	⑥	<0.5	115	16.5	790	115	5	4.0	28HRC(60HRC)	210	30	6.6
F-0008-75HT⑤	590	85	⑥	⑥	<0.5	135	19.5	900	130	6	4.5	32HRC(60HRC)	240	34	6.9
F-0008-85HT⑤	660	95	⑥	⑥	<0.5	150	21.5	1000	145	7	5.0	35HRC(60HRC)	280	38	7.1
铁-铜和铜钢															
FC-0200-15④	170	25	140	20	1.0	95	14.0	310	45	6	4.5	11HRB	70	10	6.0
FC-0200-18④	190	28	160	23	1.5	115	16.5	350	51	7	5.0	18HRB	72	11	6.3
FC-0200-21④	210	31	180	26	1.5	115	16.5	390	56	7	5.5	26HRB	80	12	6.6
FC-0200-24④	230	34	200	29	2.0	135	19.5	430	63	8	6.0	36HRB	87	13	6.9
FC-0205-30④	240	35	240	35	<1.0	95	14.0	410	60	<3	<2.0	37HRB	90	13	6.0
FC-0205-35④	280	40	280	40	<1.0	115	16.5	520	75	4	3.0	48HRB	100	15	6.3
FC-0205-40④	340	50	310	45	<1.0	120	17.5	660	95	7	5.0	60HRB	140	21	6.7
FC-0205-45④	410	60	340	50	<1.0	150	21.5	790	115	10	8.0	72HRB	210	31	7.1
FC-0205-60HT⑤	480	70	⑥	⑥	<0.5	110	16.0	660	95	3	2.5	19HRC(58HRC)	190	27	6.2
FC-0205-70HT⑤	550	80	⑥	⑥	<0.5	105	15.5	760	110	5	3.5	25HRC(58HRC)	210	30	6.5
FC-0205-80HT⑤	620	90	⑥	⑥	<0.5	130	18.5	830	120	6	4.5	31HRC(58HRC)	230	34	6.8
FC-0205-90HT⑤	690	100	⑥	⑥	<0.5	140	20.5	930	135	7	5.5	36HRC(58HRC)	260	38	7.0
FC-0208-30④	240	35	240	35	<1.0	85	12.5	410	60	<3	<2.0	50HRB	90	13	5.8
FC-0208-40④	340	50	310	45	<1.0	115	16.5	620	90	3	2.0	61HRB	120	17	6.3
FC-0208-50④	410	60	380	55	<1.0	120	17.5	860	125	7	5.0	73HRB	160	23	6.7
FC-0208-60④	520	75	450	65	<1.0	155	22.5	1070	155	9	7.0	84HRB	230	33	7.2
FC-0208-50HT⑤	450	65	⑥	⑥	<0.5	105	15.0	660	95	3	2.5	20HRC(60HRC)	170	25	6.1
FC-0208-65HT⑤	520	75	⑥	⑥	<0.5	120	17.5	760	110	5	3.5	27HRC(60HRC)	210	30	6.4
FC-0208-80HT⑤	620	90	⑥	⑥	<0.5	130	18.5	900	130	6	4.5	35HRC(60HRC)	240	35	6.8
FC-0208-95HT⑤	720	105	⑥	⑥	<0.5	150	21.5	1030	150	7	5.5	43HRC(60HRC)	280	40	7.1
FC-0505-30④	300	44	250	36	<0.5	85	12.5	530	77	4	3.0	51HRB	114	17	5.8
FC-0505-40④	400	58	320	47	<0.5	115	16.5	700	102	6	4.5	62HRB	152	22	6.3
FC-0505-50④	490	71	390	56	<1.0	120	17.5	850	124	7	5.0	72HRB	186	27	6.7
FC-0508-40④	400	58	340	50	<0.5	90	13.0	690	100	4	3.0	60HRB	152	22	5.9
FC-0508-50④	470	68	410	60	<0.5	115	16.5	830	120	5	3.5	68HRB	179	26	6.3
FC-0508-60④	570	82	480	70	<1.0	130	18.5	1000	145	6	4.5	80HRB	217	31	6.8
FC-0808-45④	380	55	340	50	<0.5	95	14.0	590	85	4	3.0	65HRB	144	21	6.0
FC-1000-20④	210	30	180	26	<1.0	95	14.0	370	53	5	3.5	15HRB	80	11	6.0

（续）

材料代号	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm的伸长率（%）	弹性模量		横向断裂强度		冲击吸收功①		表观硬度②	疲劳强度③		密度/（g/cm³）
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	MPa	ksi	J	lbf·ft		MPa	ksi	
铁-镍和镍钢															
FN-0200-15④	170	25	120	17	3.0	115	16.5	340	50	14	10.0	55HRF	70	10	6.6
FN-0200-20④	240	35	170	25	5.0	140	20.5	550	80	27	20.0	75HRF	91	13	7.0
FN-0200-25④	280	40	210	30	10.0	160	23.5	720	105	68	50.0	80HRF	103	15	7.3
FN-0205-20④	280	40	170	25	1.5	115	16.5	450	65	8	6.0	44HRB	100	14	6.6
FN-0205-25④	340	50	210	30	2.5	135	19.5	690	100	16	12.0	59HRB	120	18	6.9
FN-0205-30④	410	60	240	35	4.0	155	22.5	860	125	28	21.0	69HRB	150	22	7.2
FN-0205-35④	480	70	280	40	5.5	170	24.5	1030	150	46	34.0	78HRB	180	26	7.4
FN-0205-80HT⑤	620	90	⑥	⑥	<0.5	115	16.5	830	120	5	3.5	23HRC(55HRC)	180	26	6.6
FN-0205-105HT⑤	830	120	⑥	⑥	<0.5	135	19.5	1110	160	6	4.5	29HRC(55HRC)	240	35	6.9
FN-0205-130HT⑤	1000	145	⑥	⑥	<0.5	150	21.5	1310	190	8	6.0	33HRC(55HRC)	290	42	7.1
FN-0205-155HT⑤	1100	160	⑥	⑥	<0.5	155	22.5	1480	215	9	7.0	36HRC(55HRC)	320	47	7.2
FN-0205-180HT⑤	1280	185	⑥	⑥	<0.5	170	24.5	1720	250	13	9.5	40HRC(55HRC)	370	54	7.4
FN-0208-30④	310	45	240	35	1.5	120	17.5	590	85	7	5.5	63HRB	110	16	6.7
FN-0208-35④	380	55	280	40	1.5	135	19.5	720	105	11	8.0	71HRB	140	20	6.9
FN-0208-40④	480	70	310	45	2.0	150	21.5	900	130	15	11.0	77HRB	170	25	7.1
FN-0208-45④	550	80	340	50	2.5	160	23.5	1070	155	22	16.0	83HRB	190	28	7.3
FN-0208-50④	620	90	380	55	3.0	170	24.5	1170	170	28	21.0	88HRB	220	32	7.4
FN-0208-80HT⑤	620	90	⑥	⑥	<0.5	120	17.5	830	120	5	4.0	26HRC(57HRC)	200	29	6.7
FN-0208-105HT⑤	830	120	⑥	⑥	<0.5	135	19.5	1030	150	6	4.5	31HRC(57HRC)	260	38	6.9
FN-0208-130HT⑤	1000	145	⑥	⑥	<0.5	140	20.5	1280	185	7	5.5	35HRC(57HRC)	320	46	7.0
FN-0208-155HT⑤	1170	170	⑥	⑥	<0.5	155	22.5	1520	220	9	7.0	39HRC(57HRC)	370	54	7.2
FN-0208-180HT⑤	1340	195	⑥	⑥	<0.5	170	24.5	1720	250	11	8.0	42HRC(57HRC)	430	62	7.4
FN-0405-25④	280	40	210	30	<1.0	105	15.5	450	65	6	4.5	49HRB	100	14	6.5
FN-0405-35④	410	60	280	40	3.0	140	20.5	830	120	20	14.5	71HRB	150	22	7.0
FN-0405-45④	620	90	340	50	4.5	170	24.5	1210	175	45	33.5	84HRB	220	32	7.4
FN-0405-80HT⑤	590	85	⑥	⑥	<0.5	105	15.5	790	115	5	4.0	19HRC(55HRC)	180	26	6.5
FN-0405-105HT⑤	760	110	⑥	⑥	<0.5	130	18.5	1000	145	7	5.0	25HRC(55HRC)	230	34	6.8
FN-0405-130HT⑤	930	135	⑥	⑥	<0.5	140	20.5	1380	200	9	6.5	31HRC(55HRC)	290	42	7.0
FN-0405-155HT⑤	1100	160	⑥	⑥	<0.5	160	23.5	1690	245	13	9.5	37HRC(55HRC)	340	49	7.3
FN-0405-180HT⑤	1280	185	⑥	⑥	<0.5	170	24.5	1930	280	18	13.0	40HRC(55HRC)	390	57	7.4
FN-0408-35④	310	45	280	40	1.0	105	15.5	520	75	5	4.0	67HRB	110	16	6.5
FN-0408-45④	450	65	340	50	1.0	135	19.5	790	115	10	7.5	78HRB	160	23	6.9
FN-0408-55④	550	80	410	60	1.0	155	22.5	1030	150	15	11.0	87HRB	190	28	7.2

（续）

材料代号	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm的伸长率(%)	弹性模量		横向断裂强度		冲击吸收功[1]		表观硬度[2]	疲劳强度[3]		密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	MPa	ksi	J	lbf·ft		MPa	ksi	
低-合金钢															
FL-4205-35[4]	360	52	290	42	1.0	130	18.5	690	100	8	6.0	60HRB	140	20	6.80
FL-4205-40[4]	400	58	320	47	1.0	140	20.0	790	115	12	9.0	66HRB	190	27	6.95
FL-4205-45[4]	400	66	360	52	1.5	150	21.5	860	125	16	12.0	70HRB	220	32	7.10
FL-4205-50[4]	500	73	400	58	2.0	160	23.5	1030	150	23	17.0	75HRB	280	40	7.30
FL-4205-80HT[5]	620	90	⑥	⑥	<0.5	115	16.5	930	135	7	5.0	28HRC(60HRC)	210	30	6.60
FL-4205-100HT[5]	700	110	⑥	⑥	<0.5	130	18.5	1100	160	9	7.0	32HRC(60HRC)	260	37	6.80
FL-4205-120HT[5]	900	130	⑥	⑥	<0.5	140	20.5	1280	185	11	8.0	36HRC(60HRC)	300	44	7.00
FL-420S-140HT[5]	1030	150	⑥	⑥	<0.5	155	22.5	1480	215	16	12.0	39HRC(60HRC)	340	50	7.20
FL-4405-35[4]	300	52	290	42	1.0	120	17.5	690	100	8	6.0	60HRB	140	20	6.70
FL-4405-40[4]	400	58	320	47	1.0	135	19.5	860	125	15	11.0	67HRB	190	27	6.90
FL-4405-45[4]	400	66	360	52	1.5	150	21.5	970	140	22	16.0	73HRB	220	32	7.10
FL-4405-50[4]	500	73	400	58	2.0	160	23.5	1140	165	30	22.0	80HRB	280	40	7.30
FL-4405-100HT[5]	760	110	⑥	⑥	<1.0	120	17.5	1100	160	7	5.5	24HRC(60HRC)	230	34	6.70
FL-4405-125HT[5]	930	135	⑥	⑥	<1.0	135	19.5	1380	200	9	7.0	29HRC(60HRC)	290	42	6.90
FL-4405-150HT[5]	1100	160	⑥	⑥	<1.0	150	21.5	1590	230	12	9.0	34HRC(60HRC)	330	48	7.10
FL-4405-175HT[5]	1280	185	⑥	⑥	<1.0	160	23.5	1930	280	19	14.0	38HRC(60HRC)	400	58	7.30
FL-4605-35[4]	360	52	290	42	1.0	125	18.0	690	100	8	6.0	60HRB	140	20	6.75
FL-4605-40[4]	400	58	320	47	1.0	140	20.0	830	120	15	11.0	65HRB	190	27	6.95
FL-4605-45[4]	460	66	360	52	1.5	150	22.0	970	140	22	16.0	71HRB	220	32	7.15
FL-4605-50[4]	500	73	400	58	2.0	165	24.0	1140	165	30	22.0	77HRB	280	40	7.35
FL-4605-80HT[5]	590	85	⑥	⑥	<0.5	110	16.0	900	130	6	4.5	24HRC(60HRC)	200	29	6.55
FL-4605-100HT[5]	760	110	⑥	⑥	<0.5	125	18.0	1140	165	8	6.0	29HRC(60HRC)	260	37	6.75
FL-4605-120HT[5]	900	130	⑥	⑥	<0.5	140	20.0	1340	195	11	8.0	34HRC(60HRC)	320	46	6.95
FL-4605-140HT[5]	1070	155	⑥	⑥	<0.5	155	22.5	1590	230	16	12.0	39HRC(60HRC)	370	53	7.20
FLN-4205-40[4]	400	58	320	47	1.0	115	16.5	720	105	8	6.0	64HRB	140	20	6.60
FLN-4205-45[4]	460	66	360	52	1.0	130	18.5	860	125	11	8.0	70HRB	190	27	6.80
FLN-4205-50[4]	500	73	400	58	1.5	145	21.0	1030	150	18	13.0	77HRB	220	32	7.05
FLN-4205-55[4]	600	87	430	63	2.0	160	23.5	1210	175	30	22.0	83HRB	280	40	7.30
FLN-4205-80HT[5]	620	90	⑥	⑥	<1.0	115	16.5	900	130	7	5.0	24HRC(60HRC)	190	28	6.60
FLN-4205-105HT[5]	790	115	⑥	⑥	<1.0	130	18.5	1170	170	9	7.0	30HRC(60HRC)	250	36	6.80
FLN-4205-140HT[5]	1030	150	⑥	⑥	<1.0	145	21.0	1590	230	12	9.0	36HRC(60HRC)	320	47	7.05
FLN-4205-175HT[5]	1280	185	⑥	⑥	1.0	160	23.5	2000	290	19	14.0	42HRC(60HRC)	400	58	7.30

（续）

材料代号	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm的伸长率（%）	弹性模量		横向断裂强度		冲击吸收功①		表观硬度②	疲劳强度③		密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	MPa	ksi	J	lbf·ft		MPa	ksi	
烧结-硬化钢															
FLC-4608-50HT⑤	410	60	⑥	⑥	<1.0	115	16.5	830	120	7	5.0	20HRC(55HRC)	—	—	6.60
FLC-4608-70HT⑤	550	80	⑥	⑥	<1.0	130	18.5	1030	150	9	7.0	26HRC(55HRC)	—	—	6.80
FLC-4608-90HT⑤	690	100	⑥	⑥	<1.0	140	20.5	1310	190	12	9.0	31HRC(55HRC)	—	—	7.00
FLC-4608-110HT⑤	830	120	⑥	⑥	<1.0	155	22.5	1590	230	19	14.0	37HRC(55HRC)	—	—	7.20
扩散-合金钢															
FD-0205-45④	470	68	360	52	1.0	125	18.0	900	130	11	8.0	72HRB	170	24	6.75
FD-0205-50④	540	78	390	57	1.5	140	20.0	1070	155	16	12.0	76HRB	200	29	6.95
FD-0205-55④	610	88	420	61	2.0	150	22.0	1240	180	24	18.0	80HRB	220	32	7.15
FD-0205-60④	690	100	460	67	2.0	170	24.5	1450	210	38	28.0	86HRB	260	37	7.40
FD-0205-95HT⑤	720	105	⑥	⑥	<1.0	125	18.0	1100	160	7	5.0	28HRC(55HRC)	290	42	6.75
FD-0205-120HT⑤	900	130	⑥	⑥	<1.0	140	20.0	1310	190	9	7.0	33HRC(55HRC)	360	52	6.95
FD-0205-140HT⑤	1030	150	⑥	⑥	<1.0	150	22.0	1450	210	12	9.0	38HRC(55HRC)	450	65	7.15
FD-0205-160HT⑤	1170	170	⑥	⑥	<1.0	170	24.5	1650	240	15	11.0	45HRC(55HRC)	520	75	7.40
FD-0208-50④	480	69	400	58	<1.0	125	18.0	930	135	9	7.0	80HRB	170	24	6.75
FD-0208-55④	540	79	430	63	<1.0	135	19.5	1070	155	12	9.0	83HRB	230	33	6.90
FD-0208-60④	630	92	470	68	1.0	150	21.5	1240	180	16	12.0	87HRB	260	38	7.10
FD-0208-65④	710	103	500	73	1.0	160	23.0	1340	195	23	17.0	90HRB	320	46	7.25
FD-0405-55④	590	86	430	62	1.0	125	18.0	1100	160	15	11.0	80HRB	170	25	6.75
FD-0405-60④	710	103	460	66	1.0	145	21.0	1340	195	27	20.0	85HRB	200	28	7.05
FD-0405-65④	850	123	480	70	2.5	165	24.0	1590	230	37	27.0	91HRB	280	40	7.35
FD-0405-100HT⑤	760	110	⑥	⑥	<1.0	125	18.0	1100	160	7	5.0	30HRC(55HRC)	230	34	6.75
FD-0405-130HT⑤	970	140	⑥	⑥	<1.0	145	21.0	1380	200	9	7.0	35HRC(55HRC)	340	50	7.05
FD-0405-155HT⑤															
FD-0408-50④	490	71	390	57	<1.0	120	17.5	900	130	12	9.0	85HRB	150	22	6.70
FD-0408-55④	620	90	430	62	1.0	140	20.0	1140	165	18	13.0	89HRB	190	27	6.95
FD-0408-60④	760	110	460	67	1.5	155	22.5	1380	200	24	18.0	93HRB	200	38	7.20
FD-0408-65④	860	125	490	71	2.0	170	24.5	1590	230	30	22.0	95HRB	330	48	7.40
铜-渗透钢															
FX-1000-25④	350	51	220	32	7.0	160	23.5	910	132	34	25.0	65HRB	133	19	7.3
FX-1005-40④	530	77	340	50	4.0	160	23.5	1090	158	18	13.0	82HRB	200	29	7.3
FX-1005-110HT⑤	830	120	⑥	⑥	<0.5	160	23.5	1450	210	9	7.0	38HRC(55HRC)	230	33	7.3
FX-1008-50④	600	87	410	60	3.0	160	23.5	1140	166	14	10.0	89HRB	230	33	7.3
FX-1008-110HT⑤	830	120	⑥	⑥	<0.5	160	23.5	1300	189	9	6.5	43HRC(58HRC)	280	41	7.3

（续）

材料代号	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm的伸长率(%)	弹性模量		横向断裂强度		冲击吸收功①		表观硬度②	疲劳强度③		密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	MPa	ksi	J	lbf·ft		MPa	ksi	
铜-渗透钢															
FX-2000-25④	320	46	260	37	3.0	145	21.0	990	144	20	15.0	66HRB	122	17	7.3
FX-2005-45④	520	75	410	60	1.5	145	21.0	1020	148	11	8.0	85HRB	140	20	7.3
FX-2005-90HT⑤	690	100	⑥	⑥	<0.5	145	21.0	1180	171	9	7.0	36HRC(55HRC)	100	23	7.3
FX-2008-60④	550	80	480	70	1.0	145	21.0	1080	156	9	7.0	90HRB	100	23	7.3
FX-2008-90HT⑤	690	100	⑥	⑥	<0.5	145	21.0	1100	159	7	5.0	36HRC(58HRC)	190	27	7.3

注：表中第一列“材料代号”中的最后二或三位数字规定为最小强度值，单位为ksi。

①无缺口夏比试验。 ②表观硬度为测量基体硬度再结合孔隙率对其的影响。使用时，括号里的(经转换的)为基体硬度。③交变弯曲10^7次试验(R. R. 摩尔试验机)的疲劳极限。 ④词尾的数字代表材料烧结状态的最小屈服强度(ksi)。 ⑤对于经热处理或烧结硬化的词尾数字代表最小屈服强度(ksi)。大部分热处理材料的退火温度为175℃(350℉)。镍钢的回火温度为260℃(500℉)。 ⑥热处理材料的屈服强度和抗拉强度近似相同。

引自：MPIF标准35，1997版。

用单质粉末生产的铁质材料。用单质铁粉制成的铁质P/M材料的MPIF代号包括一个或多个字母为词头(第一个字母F表示铁质材料)、四位数字及一个词尾。词头中的第二个字母，如C为铜、N为镍，代表主要合金元素(如果已将其规定)；该元素的百分比含量用前两位数字代表。第三、四位数字表示在压实和烧结零件中的含碳量(质量分数)，编码00表示低于0.3%，05表示0.3%~0.6%，08表示0.6%~0.9%。词尾用来表示烧结后零件的最小0.2%相对屈服强度和热处理材料的抗拉强度，单位为10^3psi(6.894MPa)。而字母HT表示热处理。用单质粉末生产的铁质材料包括铁和碳钢、铁-铜和铜钢及铁-镍和镍钢，如表2.5-2和表2.5-3所示。

用预制合金粉末生产的铁质材料。在预制合金P/M低合金钢的情形里，上述的四位数字系列用美国钢铁协会(AISI)编码系统所规定的代号代替。举例FL-4605-100HT，字头FL表示预制合金的低合金铁质材料，四位数字(4605)代表镍-钼低合金钢。

当用单质添加剂改善预制合金P/M钢粉末时，就用一组三或四位的字母数字编码表示，例如FLN-4205表示一种添加了单质镍(N)的预制合金钢粉末(FL)。表2.5-2和表2.5-3也列出了预制合金低合金P/M钢的成分和性能。

烧结-硬化材料。这也是一种利用含有镍、钼和锰作为主要合金元素的材料的预制合金低-合金钢粉末生产得到的。它们还含有铜和/或镍的单质添加剂。由于其成分组成，这些材料都可以在烧结后的冷却过程中进行淬火硬化，因而省略了后续热处理的步骤(即降低成本)。表2.5-2和表2.5-3列出了烧结-硬化P/M钢的成分和性能。它们一般适用于要求高强度和高耐磨性的用途。

扩散-合金材料。在这种材料里，钼、镍和铜合金元素以研细的单质或氧化物形式加入铁粉中。然后它们与铁粉在退火工序里一起被还原，使这些元素能在铁中坚固地粘附和部分地扩散。相对于单质混合物，这种部分合金化能提高其淬硬性，还使这种粉末具有良好的压缩性。合金元素的扩散粘结还能降低粉末偏集的趋势。表2.5-2和表2.5-3列出了扩散-合金材料的成分和性能，在MPIF标准35里用字头FD表示。如同前面已提到过的，这些材料也适合用温压实工艺。表2.5-4比较了温压实和烧结、冷压实和烧结，以及二次压制/二次烧结(用冷和温的两次固结方法)三种方法制造得到的扩散-合金钢的性能。这些数据表明了温压实工艺所能实现的优异性能。

铜渗-透铁和钢。铁质P/M坯块用铜渗透(w(Cu)为10%~20%)可提高其强度、硬度、抗疲劳性和冲击吸收功。如图2.5-1所示，密度≥7.5g/cm³的是不难获得的。这个图也表明了铜渗透的一个缺点，就是成本太高。按MPIF标准35用字头FX表示的渗透铁和钢的成分和性能如表2.5-2和表2.5-3所示。下面还有更多的相关内容(见“铁质P/M材料的性质”所讨论的)。

表2.5-4　工艺对于烧结铁质零件的密度和横向断裂强度的影响

基础材料	工艺方法①	压实压力		密度/(g/cm³)	横向断裂强度		硬度 HRB
		MPa	tsi		MPa	ksi	
安科斯蒂尔(Ancorsteel)85HP②	温压实，SP/SS	415	30	7.18	1100	159.5	83
		550	40	7.36	1325	192.1	88
		700	50	7.47	1340	194.6	91
	温压实，DP/DS	415	30	7.36	1340	194.6	89
		550	40	7.54	1495	216.7	92
		700	50	7.63	1530	221.7	94
	冷压实，SP/SS	415	30	7.01	995	144.3	79
		550	40	7.22	1145	166.0	85
		700	50	7.32	1280	185.7	88
	冷压实，DP/DS	415	30	7.22	1240	180.2	87
		550	40	7.42	1460	212.0	92
		700	50	7.50	1530	221.9	94
迪斯特劳埃(Distaloy)4800A③	温压实，SP/SS	415	30	7.04	1205	174.8	90
		550	40	7.27	1375	199.6	94
		700	50	7.35	1450	210.1	97
	热压实，DP/DS	415	30	7.20	1505	218.5	94
		550	40	7.40	1690	245.4	97
		700	50	7.49	1695	246.0	100
	冷压实，SP/SS	415	30	6.90	975	141.4	81
		550	40	7.08	1265	183.5	87
		700	50	7.20	1340	194.1	91
	冷压实，DP/DS	415	30	7.12	1375	199.4	90
		550	40	7.34	1645	238.4	94
		700	50	7.46	1800	261.1	96

①SP/SS，一次压制/一次烧结；DP/DS，二次压制/二次烧结；　②安科斯蒂尔(Ancorsteel) 85HP是一种预制合金钢粉末，含(质量分数)有2.0% Ni、0.85% Mo、0.4%石墨和0.6%润滑剂。坯块在1260℃(2300℉)中烧结。　③迪斯特劳埃(Distaloy)4800A是一种扩散合金钢粉末，含(质量分数)有4.0% Ni、1.5% Cu、0.50% Mo、0.5%石墨和0.6%润滑剂。坯块在1120℃(2050℉)中烧结。

引自：Hoeganaes Corporation。

铁质P/M材料的性质

压实和烧结的铁质P/M材料的力学和物理性能决定于许多因素。有些因素如显微组织、化学成分和热处理，都会影响铁质P/M材料的性能，就像它们对锻钢和铸钢的影响一样。然而，这些因素本身又受到只是P/M才特有的一些工况条件的影响，例如铁粉种类、合金添加成分是预制合金的或是混合的、加入粉末里的润滑剂的种类和数量、不同的压实工艺以及烧结条件。例如用预制合金粉末制成的零件的强度和韧性一般都高于用单质混合粉末制成的，假定这两种粉末得到的压实密度相同。不同的P/M工艺(如压实压力和烧结温度)也会影响P/M材料的性质。

孔隙度/密度的影响。锻压和P/M两种材料的显微组织的最大区别在于，P/M材料中常能见到的孔隙度。这种孔隙度起因于粉末颗粒间的间距，并通过

烧结和后续二次工序保持到一定程度。图2.5-8所示就是P/M材料孔隙的一个例子。

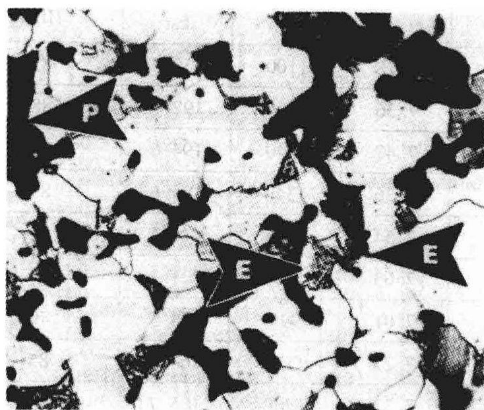


图2.5-8　雾化铁加入0.3%石墨生成0.1%~0.2%的化合碳（6.7g/cm³）。在410～480MPa（30～35tsi）的压力、1120℃（2050℉）的温度下并且在游离氨的气氛里压制30min。白色区域为铁素体。箭头E所合围的是一团共析体（珠光体）。箭头P所指的是一孔隙。2%的硝酸乙醇腐蚀。545×

粉末冶金材料要依据确保烧结后的最小0.2%相对屈服强度和热处理后的最小抗拉强度（参见表2.5-3）拟定其技术条件。尽管如此，对于一种特定的原铁粉及其烧结的程度，力学性能总是随密度的增加而提高。设计工程师根据系统应当为确保最低性能而选择所需要的强度和化学成分，而零件的制造人员则应当为满足其性能而选择密度、原铁、烧结和热处理。表2.5-3列出了由MPIF标准规定的P/M材料所有应确保的最小拉伸性能及其相关的一般性能，其中包括密度。表2.5-4列出不同的工艺路线对于铁质P/M零件性质的影响。

经热处理的2%Ni钢，FN-0208的密度对于力学性能的影响如图2.5-9所示。烧结的纯铁，F-0000的密度对力学性能的影响如图2.5-10所示。

P/M材料的表观硬度是用常规洛氏硬度计测量的。用HRC、HRB和HRF的刻度值测量压痕的阻力（表2.5-3）。它们都是将基体材料的实际硬度与孔隙

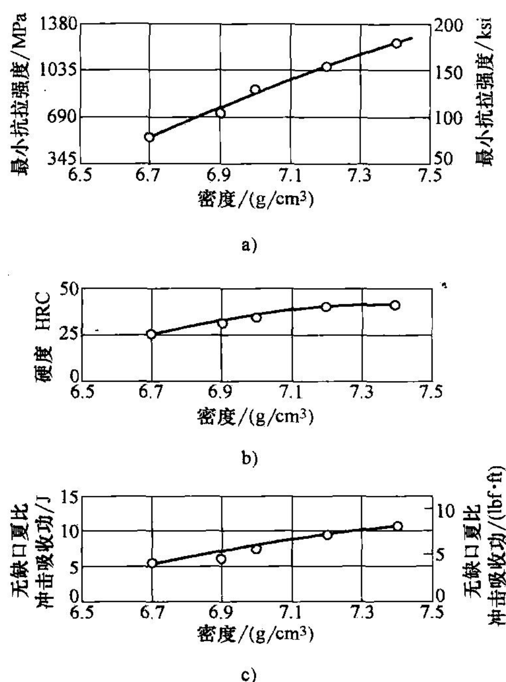


图2.5-9　密度对热处理FN-0208镍钢的力学性能的影响

a）最小抗拉强度　b）硬度　c）冲击韧度

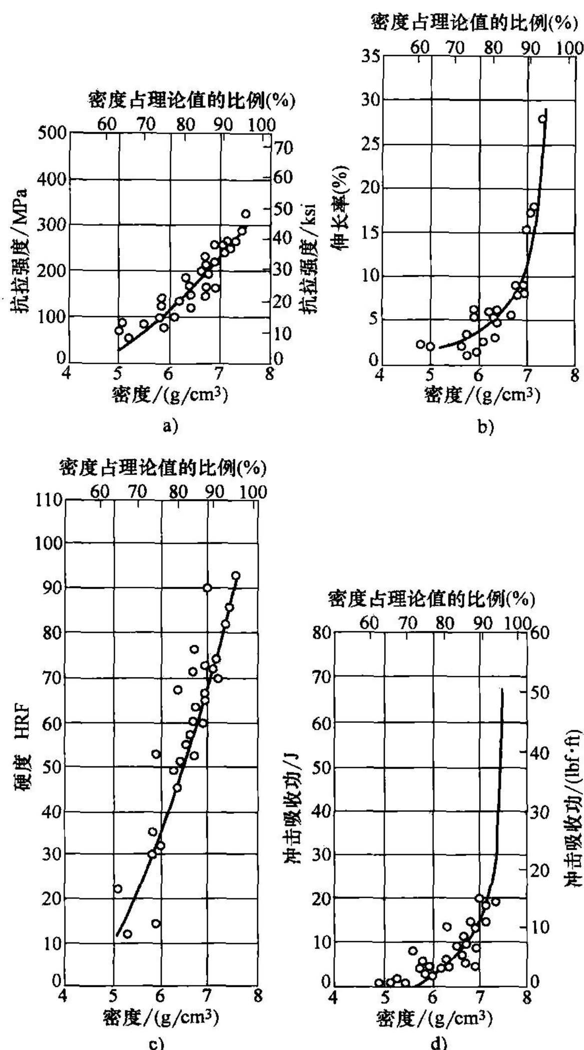


图2.5-10　密度对烧结纯铁（F-0000）的力学性能的影响

a）抗拉强度　b）伸长率　c）硬度

d）无槽口夏比冲击吸收功

度进行平均，故其读数低于相应的全密度材料。当将其用于零件的规定部位，并取五次读数的平均时，将其用于质量控制是十分有效的，表2.5-5所示是一些常用的洛氏硬度和可预期的精度。

表2.5-5　P/M零件的洛氏表观硬度值的精度

MPIF材料代号	密度/(g/cm³)	实验室数量	平均表观硬度	重复性精度①(95%置信度)		再现性精度①(95%置信度)	
				单一读数	6读数平均	单一读数	6读数平均
F-0000	6.74	9	63.4HRF	4.0	1.6	4.4	1.8
FC-0208	6.63	9	70.8HRB	4.5	1.8	5.7	2.3
FX-2008	7.45	9	86.4HRB	4.3	1.8	4.9	2.0
FL-4605-HT	6.90	8	107.2HRB②	1.9	0.8	3.1	1.3
FL-4605-HT	6.90	8	34.6HRC	2.2	0.9	3.1	1.3
FC-0208-HT	6.29	10	97.1HRB②	3.1	1.3	4.4	1.8
FC-0208-Hf	6.29	10	18.7HRC	4.2	1.7	5.1	2.1
FN-0208-HT	6.89	10	105.3HRB②	2.9	1.2	4.1	1.7
FN-0208-HT	6.89	10	30.5HRC	3.8	1.5	4.6	1.9

注：所有实验室用一级性的试件。如果使用相似而又不同的试件，其差异性将增加，预计各个读数间的差值也会更大。

①按照ASTM E691定义重复性精度和再现性精度。　②HRB刻度值用的是1.6mm($^1/_{16}$in)直径的硬质合金球的压头。

经热处理，材料的耐擦伤或耐磨损性能可以用100g的努氏显微硬度计进行测量。借助显微镜可以测量孔隙之间固体部分上的硬度，依此测量得到基体钢原有的硬度。借助MPIF标准51所介绍的方法——粉末冶金材料的显微硬度的测定法——可以将努氏显微硬度转换成HRC硬度读数。在实验室里，采用上述常规方法测量经热处理的4650P/M钢的显微硬度，并取6个读数的平均值，则实验室间的再现性精度为HRC数值3。若用努氏100g显微硬度测量方法取6个读数平均值进行比较，其实验室间的再现性精度为努氏数值48。

在常见的密度范围里，铁质P/M材料的疲劳极限大约为其抗拉强度的25%~40%，而与成分无关。表2.5-3列出了一般的疲劳极限值。一般认为与显微组织变化无关的孔隙率对弹性模量的影响可作为一种性能，见图2.5-11和表2.5-3所示。

成分的影响。将合金元素加入铁质P/M材料的目的跟将其加入到锻钢和铸钢里的一样：主要是为了提高强度和淬硬性。铁质P/M材料中最为常用的合金元素为碳、铜、镍和钼。选择的合金元素应易于在氢中还原。合金添加量对于材料性能是很重要的，但同样重要的是合金元素的形式及其来源，尤其他们是作为单质粉或预制合金粉加入的。单质添加剂有较好的压缩性，而预制合金能获得较深的硬化。

在P/M合金中，碳是最重要的合金元素，因为它能使铁强化并因此能进行热处理。碳含量对烧结铁的抗拉强度的影响如图2.5-12所示。这种强化效果可以追溯到显微组织中珠光体数量的增加。经烧结的过共析体P/M钢的强度非常低，因为在奥氏体晶粒边界生成先共析渗碳体。孔隙间的脆性渗碳体在较低

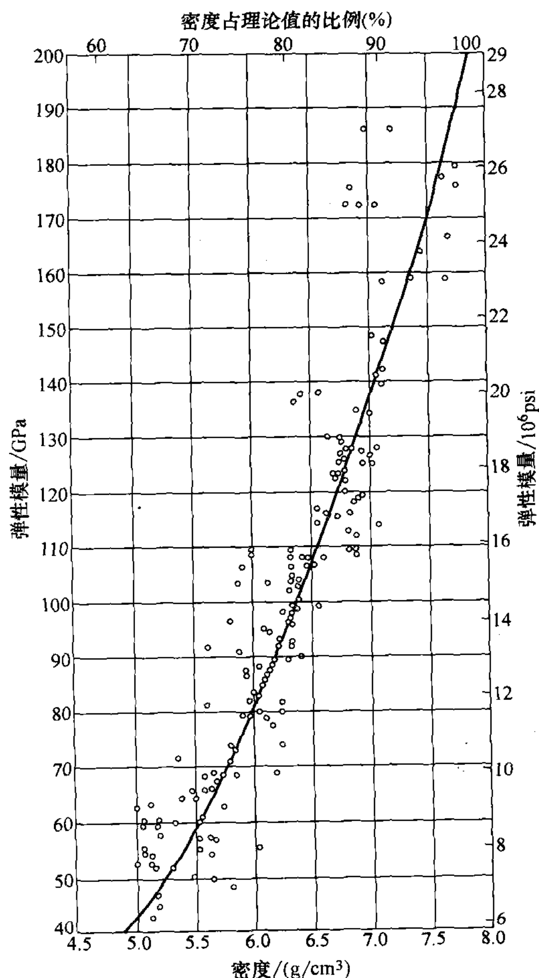


图2.5-11　烧结铁和钢在烧结成不同的密度之后，其密度对弹性模量的影响

的显微应力作用下也会发生断裂。化合碳的含量(质量分数)要求不超过0.8%。

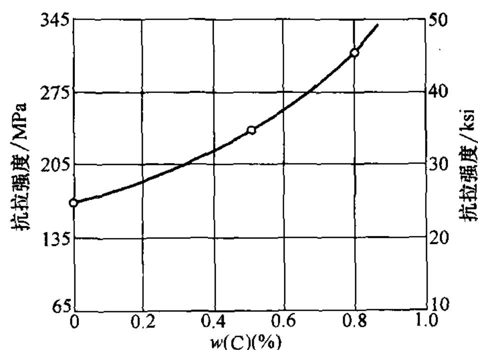


图2.5-12　6.7g/cm³的烧结铁碳合金的抗拉强度,以其含碳量为函数

通常用非常低的含碳量制成铁和预合金钢粉末,使其压缩性达到最大;碳以混合石墨的形式加入这些粉末中。这种坯块里的含碳量还受烧结气氛成分的影响。作为化合碳保留在烧结坯块里的石墨数量取决于烧结的气氛和温度、石墨和金属粉末的来源和类型,以及金属粉末中的氧化物种类和数量。对于每一批的铁粉都要靠经验确定正确的石墨添加量。

如图2.5-13所示,铜主要通过固溶体的强化来提高铁质P/M材料的强度。据称铜还能加速烧结和均质化的过程,特别是如果在烧结的早期存在着液态的单质铜或富铜母合金。在烧结过程中,铜可以使经雾化处理的铁质坯块膨胀,于是铜的添加可用于补偿铁-碳或Fe-C-Ni合金的收缩。用单质铜调和的海绵铁是不会膨胀的。

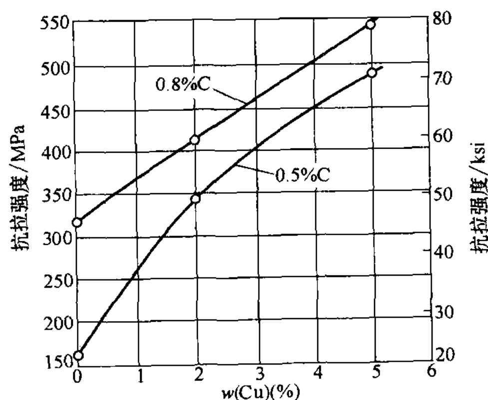


图2.5-13　铜和碳含量对铁质P/M材料的抗拉强度的影响

镍通过固溶体强化铁质P/M合金并提高其淬硬性。镍含量对P/M镍钢力学性能的影响如图2.5-14所示。镍的存在还会提高烧结时的收缩率,而铜的加入有助于在烧结中使尺寸保持不变。带有富镍岛形的非均匀显微组织(见图2.5-15)会降低其对缺口的敏感性,并提高其热处理材料的抗拉强度和抗冲击性。铜有助于镍在铁里的溶解,并提高淬硬性。

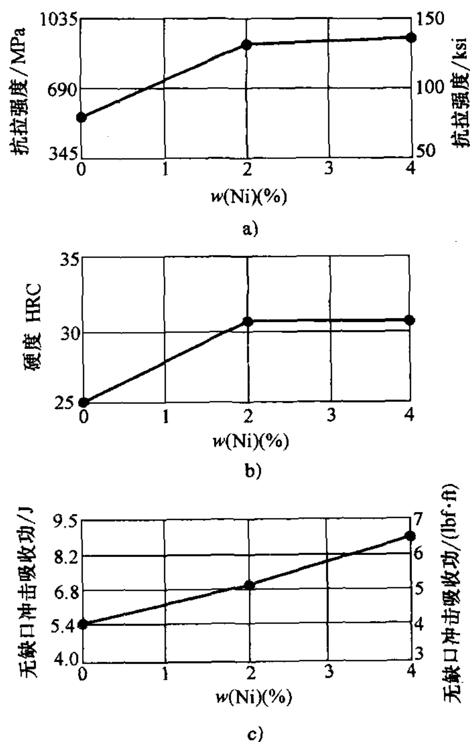


图2.5-14　镍对热处理的P/M钢(7.0g/cm³)的力学性能的影响

钼和镍是为提高淬硬性最常用的元素。按MPIF代号的FL-4605和FL-4205,这两种元素的含量都相对较低。一般使用这两种元素的预制合金粉末在成分上与46*xx*和42*xx*锻钢相当,只是有较高的含钼量和较低的含锰量。

一些含有超量钼和锰的预制合金钢(烧结硬化钢)当调和了2%Cu和共析体碳在常规的带式炉里进行烧结时,具有足够的空气硬化淬硬性。烧结后零件在175℃(350℉)里回火1h。

磷会降低烧结所用的温度。当w(P)为0.45%~0.80%时,它会形成一种液相,使孔隙快速圆形化,以此提高强度和韧性。它还能在磁心用途里减少磁滞损耗。磷在锻钢里造成热脆性,然而在P/M材料里一般不会有问题。

将硫加入铁质P/M材料可以改善其切削性。硫在P/M材料里的用量超过其在锻钢里的用量,然而

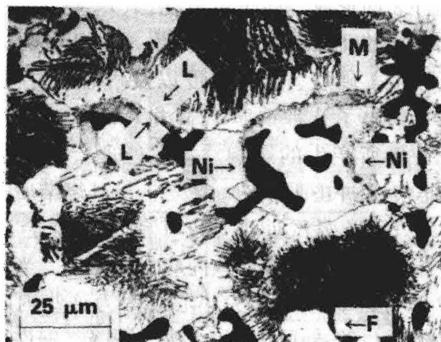


图 2.5-15　烧结 Fe-2Ni-0.5C 合金的显微组织。在 1120℃(2050℉)里烧结 30min。标注 Ni 的箭头指示的是富镍颗粒。M 箭头为富镍边界上的马氏体或贝氏体。L 箭头为镍与珠光体之间的扩散层。这不属于非合金铁素体。F 箭头为铁素体。4%的硝酸乙醇溶液腐蚀

w(S)高达 1.0%时，似乎也不会对烧结坯块的力学性能造成什么影响。硫可以作为单质硫或作为硫化锰粉末加入海绵铁里，通过预制合金化生成 MnS。作为预制合金的形式，能使钻削时间缩短一半。

不管如何，成为氧化物的合金化元素能经济地应用于低合金铁质 P/M 材料中，这些氧化物在一般的烧结气氛里表现稳定。有时也使用非常少量的锰和铬，而钒和钛则很少使用。

渗透的影响。铁质 P/M 材料的渗透是一项很普通的工艺技术。将通常为铜基合金的渗透剂与尚未烧结的坯块接触放置，然后以高于渗透剂熔点的温度里将两者在一起进行烧结。通过毛细管作用将渗透剂吸入铁质坯块中，以此促进铁颗粒的烧结。还有一种方法是在铁质坯块烧结后的下一步再进行渗透。

如图 2.5-16 和表 2.5-3 所示，与铁-碳基体比较通过渗透可以提高铁质 P/M 产品的强度、硬度、疲劳强度和冲击吸收功。渗透可以增加零件的密度(见图 2.5-1)和减少密度的差异。通过渗透能部分或全部地消除孔隙率。由于渗透是在毛细管的作用下进行，所以它首先填满零件中高密度的细孔隙部分。新近的专用技术能使无缺口冲击吸收功提高到 200J(150lbf·ft)以上。渗透的一些缺点就是其成本增加(见图 2.5-1)、在渗透过程中零件尺寸可能增大，以及坯块表面有可能受到渗透剂的侵蚀。

热处理的影响。铁质 P/M 材料可以用与成分相似的锻钢或铸钢相同的方法进行热处理。P/M 材料孔隙率造成的影响较为复杂，例如淬硬性明显下降、渗碳和脱碳深度加大以及可能有残留的淬火介质。孔隙率对于淬硬性的影响如图 2.5-17 所示，这种影响

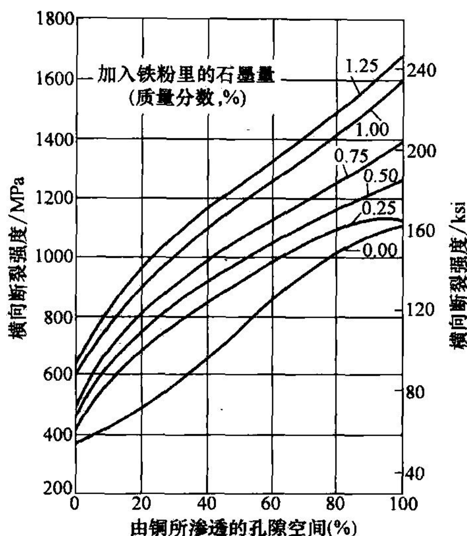


图 2.5-16　渗透对烧结密度为 6.4g/cm³ 的铁碳合金的横向断裂强度的影响。合金中的化合碳约为加入铁粉里的石墨数量的 80%。铜渗透剂用量调整为填满孔隙空间的不同比例

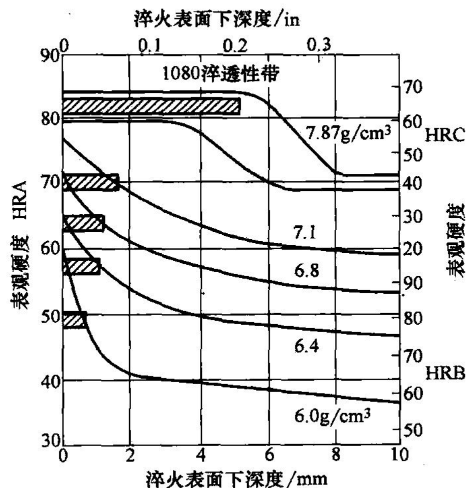


图 2.5-17　孔隙率对淬透性的影响。按不同密度压制和烧结 F-0008 粉末的坯块，然后将其奥氏体化和端部淬火。横截面测试的表观硬度反映了坯块的硬化深度和坯块的密度。水平直方条代表在显微组织中马氏体的数量超过50%的近似深度。图中还出示了 1080 锻钢的淬透性带(含锰量较高)作为比较

在表观硬度的测量过程中还会被加大。淬硬性降低是由疏松的烧结坯块的热导性降低所造成的。孔隙率对渗碳深度的影响如图 2.5-18 所示。烧结坯块的孔隙率使碳氮共渗气体得以很好地渗入到表面下，故坯块也就被硬化到更深的深度。真空渗碳 2～10min 后再

进行淬火，因此在密度低至6.8g/cm³的低碳零件上形成一定厚度的淬硬层。

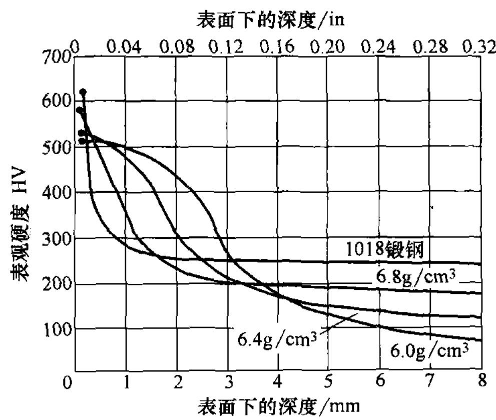


图2.5-18　孔隙率对碳氮共渗的影响。按不同密度压制和烧结F-0008粉末的坯块，然后将其碳氮共渗。横截面测试的硬度反映了碳氮共渗层的深度和坯块的密度。图中还出示了1080锻钢的碳氮共渗试件的横向测试硬度作为比较

不同回火温度对FN-0205镍钢性能的影响如图2.5-19所示。在该图中还示出了成分相似的锻钢的抗拉强度，以此说明孔隙率对于P/M材料强度的负面影响。

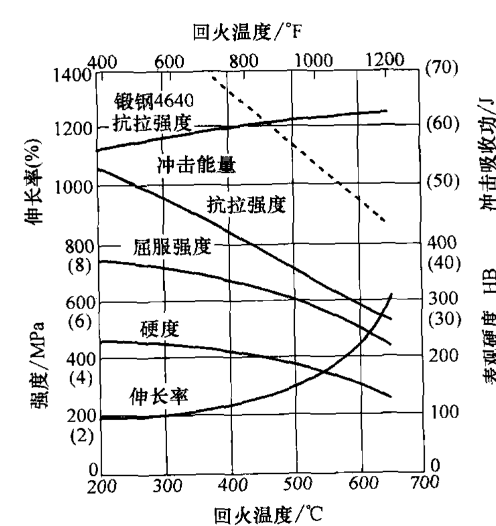


图2.5-19　回火温度对硬化-回火的FN-0205烧结镍钢的力学性能的影响。试件通过870℃（1600℉）淬火和不同温度的回火进行硬化。图中还出示了4640锻钢的拉伸数据作为比较

蒸汽处理是一种时而用于铁质P/M材料的热处理。一种典型的处理为在540～600℃（1000～1100℉）的过热蒸汽里放置2h。经过如此处理，会在烧结零件表面形成一层黑色氧化铁（Fe_3O_4），包括与表面相连接的孔隙表面层也会有。这种工艺可以增加零件的密度、硬度、压缩强度以及耐磨、耐腐蚀性。表2.5-6列出了几种铁质P/M材料的蒸汽处理对其密度和硬度所产生的影响。蒸汽处理会降低抗拉强度、伸长率和冲击吸收功，使之低于其烧结后的数值（表2.5-7）。经蒸汽处理，P/M钢的塑性会显著下降，由于氧化铁的形成导致内应力的产生。当要处理高碳P/M钢时，必须尤为小心，因为这些内应力会引发微裂纹，并造成塑性的大幅度下降。据许多案例的报告，经过蒸汽处理的零件不慎掉落地面都会像玻璃一样粉碎。为防止发生这种现象，建议最好规定需要蒸汽处理的材料中$w(C)$要小于0.5%。

表2.5-6　蒸汽处理对铁质P/M材料的密度和硬度的影响

材　料	密度/(g/cm³)		表观硬度	
	烧结	蒸汽处理	烧结	蒸汽处理
F-0000	5.8	6.2	7HRF	75HRB
F-0000	6.2	6.4	32HRF	61HRB
F-0000	6.5	6.6	45HRF	51HRB
F-0008	5.8	6.1	44HRB	100HRB
F-0008	6.2	6.4	58HRB	98HRB
F-0008	6.5	6.6	60HRB	97HRB
FC-0700	5.7	6.0	14HRB	73HRB
FC-0700	6.35	6.5	49HRB	78HRB
FC-0700	6.6	6.6	58HRB	77HRB
FC-0708	5.7	6.0	52HRB	97HRB
FC-0708	6.3	6.4	72HRB	94HRB

二次压制的效果。作为在室温下的二次机械成形工序，二次压制（或重压）主要用于增加密度，并由此提高力学、物理性能和硬度。当二次压制主要为了提高尺寸精度而不是密度时，就称其为精整加工。当二次压制是为了要改变与凸模所接触的工件表面轮廓时就称为压型。例如，经烧结的毛坯可以通过压型使表面压出槽孔或字母和数字。

二次压制所取得的材料变形程度大于精整引起的变形，因为前者所用的力比后者大。铁质零件在高度上的压缩量一般为3%～5%。经过精整加工的零件公差取决于材料的种类和零件的大小。

表2.5-7　蒸汽发黑的P/M材料平均力学性能与烧结及MPIF标准35规定的一般性数值的比较

材　料	发黑①	抗拉强度		平均密度的抗拉强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	横向断裂强度		冲击吸收功②		0.2%条件屈服强度		硬度HRB
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	J	lbf·ft	MPa	ksi	
F-0000	无	138	20.0	42.7	6.20	6.4	330	47.9	5.4	4.0	—	—	37
	轻	154	22.3	45.0	6.52	1.8	367	53.2	2.7	2.0	—	—	88
	重	152	22.1	44.6	6.47	1.2	434	63.0	2.7	2.0	—	—	85
标准35	无	124	18.0	—	—	1.5	248	36.0	4.1	3.0	690	10	40HRF
F-0008	无	211	30.6	43.2	6.26	1.5	453	65.7	3.6	2.7	—	—	69
	轻	134	19.4	45.6	6.61	0.4	434	63.0	2.3	1.7	—	—	108
	重	116	16.8	45.4	6.59	0.4	450	65.2	2.4	1.8	—	—	106
标准35	无	241	35.0	—	—	<0.5	420	61	4.1	3	170	25	50
F-0208	无	331	48.0	43.2	6.27	1.2	684	99.2	4.7	3.5	—	—	87
	轻	208	30.2	45.1	6.54	0.4	606	87.9	2.7	2.0	—	—	112
	重	205	29.8	44.9	6.51	0.7	738	107	2.7	2.0	—	—	110
标准35	无	345	50	—	—	<1.0	620	90	2.7	2.0	275	40	61

①无，烧结；轻，轻度发黑，538℃(1000℉)蒸汽里保持2h；重，重度发黑，538℃(1000℉)蒸汽里保持2h。　②在室温下无缺口夏比试验。

二次压制一般是指在室温里对烧结零件的高压作用，而粉末锻压则是对预成形的P/M零件实行高压作用的过程中始终保持高温的工艺。在室温里并且在高至或超过压实所用的压力作用下，二次压制能通过降低孔隙率和对金属的冷变形加工来提高烧结P/M零件的强度。零件得到了相当的强化却是以塑性的降低为代价的。二次压制后再烧结可以增加零件的塑性和韧性却无损于强度。利用二次压制和再烧结所能得到

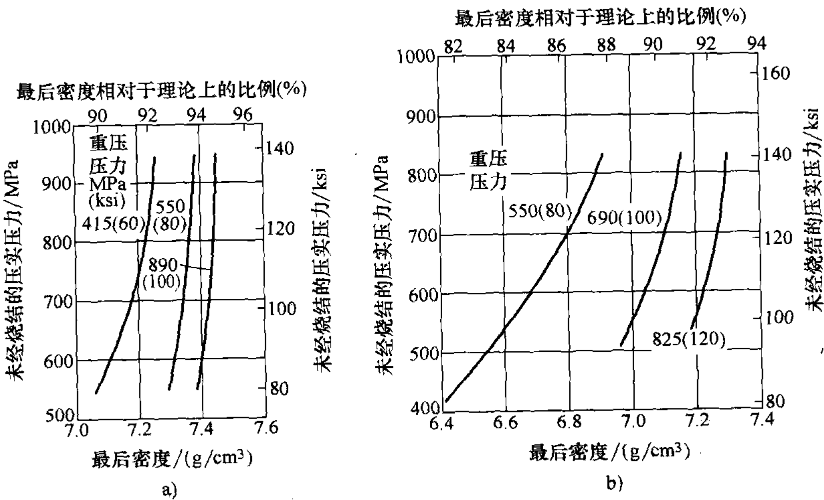


图2.5-20　重压对P/M坯块密度的影响。以不同的压力压实合金钢粉末(4640的成分)，随后烧结、重压和再烧结。对于每一块试件，其最后的密度都是用表示重压的曲线和表示未经烧结的压实压力的坐标线的交点所确定

a）预制合金粉末　b）扩散合金粉末

的性能上改善如表2.5-4所示。然而如图2.5-1所示，二次压制和再烧结的缺点在于其成本相对较高。对于一些在烧结后难以进行二次压制的材料，如果是在不发生合金化的低温里进行烧结，一般还是能够进行二次压制的；这种低温烧结叫做预烧结。对于铁合金，预烧结的温度为845℃(1550℉)。

二次压制给铁质P/M材料的密度带来的效果如图2.5-20所示。通过二次压制，取得的密度取决于烧结或预烧结坯块的密度、二次压制压力和润滑剂，以及其粉末是用预制合金方法制成还是用单质粉末混合而成的。

精选参考文献

- R.M. German, *Powder Metallurgy Science*, 2nd ed., Metal Powder Industries Federation, 1994.
- R.M. German, *Sintering Theory and Practice*, John Wiley & Sons, 1996.
- A. Lawley, *Atomization: The Production of Metal Powders*, Metal Powder Industries Federation, 1992.
- *Powder Metallurgy Design Manual*, Metal Powder Industries Federation, 1995.
- Production of Iron Powders, *Powder Metallurgy*, Vol 7, *ASM Handbook*, ASM International, 1984, p 79–99.
- A. Salak, *Ferrous Powder Metallurgy*, Cambridge International Science Publishing, 1995.
- H.I. Sanderow, *High Temperature Sintering*, Metal Powder Industries Federation, 1990.

第2节 高密度零件

借助不同的热变形方法可以生产接近和达到理论密度的铁质零件。这些方法包括以不同程度的热变形和机械变形使粉末坯体致密化。对于低合金钢零件的生产，粉末锻压和粉末注模已经获得了最大的关注。这两种粉末制造技术都已明确定型为能生产尽可能接近全密度零件的工艺。这与传统的、不以追求全密度为主要目标的工艺产品形成了鲜明对比。

粉末锻压

粉末锻压是利用传统的压制和烧结工艺制造预成型件，然后对十分疏松的预成型件进行热锻压，直至成为相当致密的最终形状。锻压就是在确定的模具里通过一次性打击消除飞边的生成并形成净形状。于是，能以极少或没有因切毛边、冲孔、切削和磨削所造成的材料损耗的方式，制造包含通孔和复杂形状的零件。粉末锻压应用于获得较高密度的P/M零件，故可用于高应力的用途，这时将孔隙减少到最低限度或完全消除。

粉末锻压主要有两种方式：

- 热镦压，其预制工艺经历一个相当程度的材料侧向流动过程。
- 热二次压制，其材料在致密化的过程中主要沿压制方向流动，有时也称之为热矫形锻压或热压型。

这两种作用于孔隙的变形模式和应力状态，可以用图2.5-21予以说明。

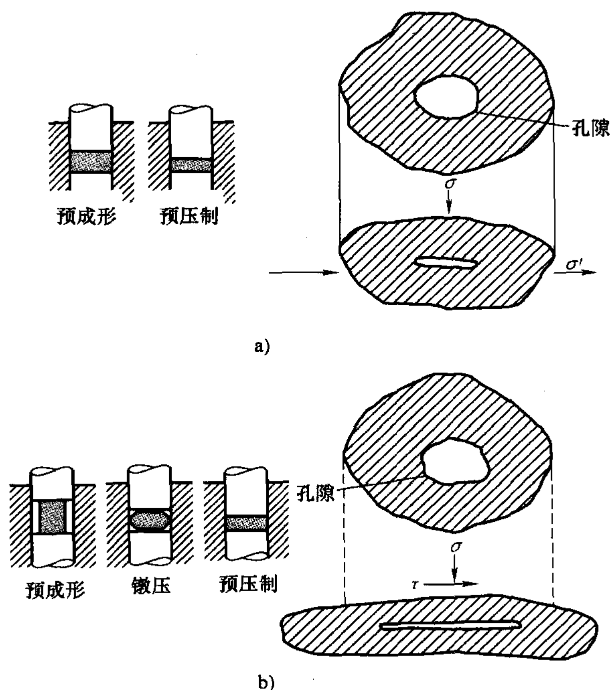


图2.5-21 孔隙的锻造模式和应力状态

a）重压 b）镦压

在热镦粉末锻压中，材料所发生的扩展性的无约束侧向流动，造成一种围绕着孔隙的应力状态，即一种法向应力与切向应力相结合的状态。于是，球形孔隙被沿侧向的流动方向压扁并延伸。因切应力而产生的滑移使得颗粒间所有残存氧化膜发生破碎，从而在碾碎的孔隙界面之间形成很强的金属粘结。由此增强材料的如断裂韧度和疲劳强度的一些动力性能。

在热二次压制粉末锻压的过程中，应力状态包含垂直应力和水平应力间的微小差异，这时造成材料在水平方向只有很小的移动，也就限制了其横向流动。在材料致密化的过程里，其应力状态接近一种纯静压状态。普通的孔隙被直接压扁，并在压力作用下孔隙相向的侧面相互贴紧。对于相似的致密化程度，热二次压制锻压比热镦压需要更高的锻压压力。与镦压相比，二次压制的颗粒间的移动也较少，使所有残存的颗粒间氧化膜破裂的可能性也随之降低，故导致其塑性和韧性的降低。

粉末锻压零件主要与铸件和锻件竞相应用于汽车用途。它们还被开发了在军事和野外设备方面的应用。典型的汽车用途包括连杆和变速箱的零件。

材料方面的考虑

粉末锻压的初始生产阶段(即预成形和烧结)与P/M工艺的常规压制和烧结是一样的。在这些工艺中，所用的粉末要求有一定的物理特性和性能。对于P/M零件，表面粗糙度与颗粒的大小分布有关。然而粉末锻压过程中，表面粗糙度与锻压模具的表面粗糙度有直接关系。

通常压制用的牌号为 -80 目，其颗粒大小中值为75μm。表观密度及其流动性对于快速和精确充满注模都是很重要的。其化学性质影响最后产生的合金以及压缩性。

用常规方法制成的P/M零件在烧结前的强度和压缩性，比采用粉末锻压制成的更加关键。虽然需要在粉末锻压的预成形中保持边棱的完整性，但是很少有薄且精密的截面零件在其烧结前就要求很高的强度。因为粉末锻压的预成形并不要求高密度(通常为6.2~6.8g/cm^3)，作为预制合金粉末所获得的可压缩性就已经足够了。然而碳并不必预合金化，因为它会对压缩性产生极为不利的影响。

粉末锻压材料有两个主要要求：形成与确保强度相适应的可淬硬性，并且通过控制显微组织特征(如夹杂物)使抗疲劳性能达到最大的能力。

可淬硬性。镍和钼具有一种在常规的烧结温度里能使它们的氧化物减少的优点。因此合金的配比也是一种折中，工业上所用的大多数雾化预合金粉末都是含镍/钼，并存在数量有限的锰。以下为三种工业用的P/M钢的化学成分。

合金	成分①(质量分数,%)		
	Mn	Ni	Mo
P/F-4600	0.10~0.25	1.75~1.90	0.50~0.60
P/F-4200	0.25~0.35	0.40~0.50	0.35~0.65
P/F-1000	0.10~0.25	—	—

①所有的成分均含有铁(余量)。

与常规的锻压材料相比，镍、钼的较高成本导致其粉末的成本也高，但它常在粉末锻压工艺中，为其所具有的材料较高利用率所抵消。

最近已有用铁粉(w(Mn)为0.10%~0.25%)添加铜和/或石墨所生产的粉末锻压零件，并将其应用于一些不要求通过热处理得到的特性或通过使用低合金钢取得高强度性能的一些零件。

夹杂物评价。由于接近全密度的经锻压材料粉末的性能受非金属夹杂物的成分、大小分布和部位的影响很大，故可采用一种方法对用于粉末锻压用途的粉末中的夹杂物含量进行评价。将准备用于锻造的粉末样品在严格控制的实验室条件下，进行二次压制粉末锻压。再将得到的坯块切片并制备成金相磨片以供金相分析。夹杂物评价技术还包括采用自动图像分析设备。用于夹杂物评价的坯块还可以用于测定所存在的非合金铁粉颗粒的数量。

工艺方面的考虑

开发适用的粉末锻压系统要求考虑许多工艺参数。在机械、冶金以及经济上的效果，在很大程度上取决于工艺条件，例如温度、压力、流动性/装料的速度、气氛和润滑系统。为了获得最佳工艺条件，必须给工艺装备的种类，如压力机、烧结炉、模具和机械手装置以及二次工艺操作以同样重要的考虑。所谓最有效也就是要通过工艺流程布局的优化来实现。

预成形。预成型件是用金属粉末、润滑剂和石墨混合料制成的。压实主要使用闭合模在常规P/M压机上完成。

为了生产全密度并在锻压件上的关键部位形成最佳性能，最重要的是控制在预成型件内的重量分布。在预成型件的任何部位若发生超重，就会造成过载应力，从而导致锻压时的模具破裂。

借助于反复试错法并利用以往的经验确定初步的形状，可以成功地进行预成型件的设计。最近已将计算机辅助设计(CAD)用于预成型件的设计。

预成型件的设计与锻压的工装设计和尺寸、锻压机的类型以及锻压工艺参数有密切的关系。预成形用的模具需要考虑的变量有：

- 温度，即预成型件的温度、模型的温度以及芯骨(如有的话)的温度；
- 锻压零件的注射温度；
- 润滑条件，即其对压实/注射力和模具温度的影响；
- 预成型件从预热炉到锻压模型型腔的搬动及其所用时间。

正确的预成型件设计不仅要求在预成型件的不同部位要有合适的材料数量，而且还考虑到材料在不同部位之间的塑性变形，并防止可能产生的断裂和缺陷。

烧结和再加热。预成型件可以从烧结炉里出来就直接进行锻压，烧结、再加热和锻压，或者在锻压工

艺后进行烧结。在铁质粉末的锻压系统中，进行烧结的基本要求为：

- 去除润滑剂；
- 氧化物的还原；
- 碳扩散；
- 颗粒接触的形成；
- 热致密化的保温。

氧化物的还原和碳扩散是烧结工序中最重要的两个方面。对于大部分的铁质粉末锻压合金，烧结是在大约1120℃(2050℉)的具有渗碳能力的还原保护气氛中进行的，以此防止发生脱碳。一般的P/M烧结在1120℃(2050℉)里进行20~30min。提高温度是为了增强氧化物的还原性和增加碳的扩散，从而能减少烧结所需用时间。铬-锰钢的使用之所以受到限制是因为其氧化物的还原需要较高的温度，而且需更加注意的是防止其再氧化。

所有各种用于烧结P/M零件的炉子，如真空炉、推炉、带炉、旋转炉、步进梁式炉、辊底炉和分批/箱式处理的炉子，都可以用于粉末锻压预成型件的烧结或再加热。经烧结的预成型件可以从烧结炉里出来就直接进行锻压，在低温下稳定后再行锻压或者冷却到室温后再加热、锻压。所有的冷却、温度稳定化和再加热都必须在保护气氛中进行，以防止发生氧化。

感应炉常用于将轴对称的预成型件再加热至锻压温度，因为这样材料加热所需的时间短。为了使完全对称的形状实现均匀加热，有时会因其不同的截面厚度而遇到困难。

锻压工艺。粉末锻压包括用机械手(一般)将加热的预成型件从炉中取出，再把它们放进模型的型腔里，以高压(690~965MPa或100~140ksi)进行锻压。预成型件可以用石墨涂层来防止在再加热或转移到锻模里时发生氧化。一般通过往型腔里喷洒水-石墨的悬浮液对凹模和凸模进行润滑。

包括锻锤、高-能量-速率成形机、机械压机、液压机、螺旋压机等常用的各种锻压压机都可以按照在粉末锻压上的用途进行分析评估。比较这些压机的主要特征就是接触时间、冲程、速度、可用的能量和载荷、刚性以及导轨精度。

粉末锻压的金属塑性变形。在常规锻造中有利于锻造和推顶出坯的拔模斜度，对于粉末锻压零件则不需要。这意味着形状简单的粉末锻压也要求较大的脱模压力——其大小至少为15%~20%的压机吨位。然而，拔模斜度的取消可以将P/M零件锻压得更加逼近真实形状。

工装设计。为了能生产出完整的零件，设计锻压工装时必须考虑：

- 预成形的温度；
- 模型温度；
- 锻压压力；
- 模型的弹性应变；
- 锻压件的弹/塑性应变；
- 出坯零件的温度；
- 出坯锻件的弹性应变；
- 在冷却过程中锻件的收缩；
- 工装的磨损。

只有上述参数都考虑到了，才能符合规定的零件尺寸公差要求。然而即使模型的尺寸已经确定，在控制零件的尺寸方面仍然还有一些灵活余地。较高的预成型件出坯温度会造成冷却时的较大收缩量。提高模型的温度会使模型型腔胀大，以致锻压零件的尺寸也随之增大。因此如果在一套已有的锻压条件下锻件的尺寸偏小，那么较低的预成型件预热温度和/或较高的模型预热温度可以用于生产尺寸稍大的零件；反之，锻件的尺寸偏大，可以通过提高预成形预热温度和/或降低模型的温度使零件尺寸达到要求。

二次加工工序。一般应用于常用零件的二次加工工序(如镀层和喷丸处理)也都可以用于粉末锻压零件。最普通的二次加工包括去毛刺、热处理和切削加工。

粉末锻压零件可以通过去毛刺或切削去除在凸模和凹模之间形成的有限的飞边。这种处理在程度上比锻钢锻件所要求的要小得多。

P/M产品的热处理与按常规制造的相似成分的材料所要求的一样。最普通的热处理工艺包括如渗碳、调质工艺或连续冷却的相变。

粉末锻压锻造所要求的切削量一般比常规锻件所要求的要少，这是因为它们的尺寸精度有所提高。采用标准切削工艺便可以得到最终要求的尺寸和表面粗糙度。粉末锻压的主要经济效益之一就是减少所要求的切削量，如图2.5-22所示。

一般，无孔隙粉末材料像经过常规加工具有相同成分、组织和硬度的锻件一样地容易切削。然而，如果粉末锻压零件采用与常规零件相同的切削速度、进给量和刀具种类进行切削会遇到一些困难。在切削性能方面的这些差异与其夹杂物和显微孔隙度的类型有关。可以通过加入如硫化锰的固体润滑剂来改善其切削性能。

然而，粉末锻压零件里显微孔隙度及低密度部分的存在会导致切削性能的降低。这些部分的切削特性与常规P/M材料相似。粉末锻压零件的整体切削性

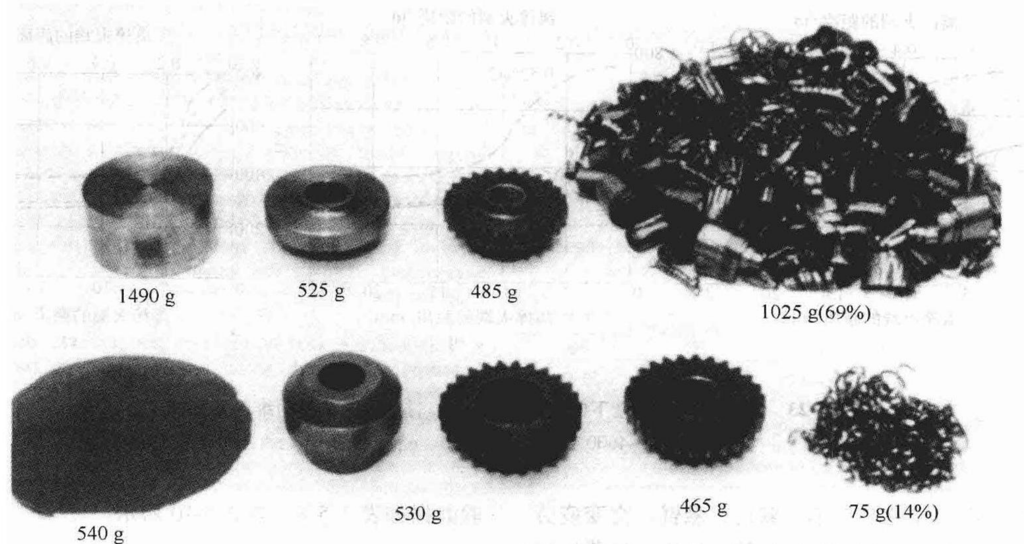


图2.5-22　锻造的反向中间齿轮(上面的)与用粉末锻压的同样齿轮的材料利用率的比较。常规锻件的材料利用率为31%，粉末锻压的为86%。1lb=453.6g

能取决于夹杂物和/或孔隙度的数量、类型、大小、形状和分散度，此外还取决于合金含量和热处理组织。

力学性能

在原始钢锭的开坯和轧制过程中，锻钢钢棒要经受延伸变形。因此会形成一种夹杂物呈断续条状排列，并造成弱性层面，由此对材料的塑性失效造成影响。锻钢的力学性能在相当程度上随其试件从锻坯上割取的方向不同而不同。另一方面，粉末锻压材料经受相对较少的材料变形，而且其力学性能也表现得比较各向同性。

粉末锻压材料的力学性能通常介于锻钢的纵向和横向性能之间。粉末锻压材料的交变弯曲疲劳性能的表现也是处于具有同样抗拉强度的锻钢的纵向和横向性能之间。

诚然，实验室的加工试件的性能遵循上述居中的特点，可是粉末锻压零件在实际应用中会表现出超抗疲劳性。一般来说，这不仅归功于粉末锻件力学性能的各向同性，而且是因为其较好的表面粗糙度和较细的晶粒大小。

以下所列的数据(未见所列数据,原文如此—译者注)代表标准实验室的加工试件的试验结果。所提供的数据是以四种主要材料为依据的。前两种材料系统依据的是预合金粉末(P/F-4600和P/F-4200)。第三种依据Fe-Cu-C的材料是1981年丰田公司用于制造粉末锻压连杆；福特汽车公司1986年引入用类似化学成分制造的粉末锻压连杆。因此所列的力学性能数据为以铁粉为主的混入铜和石墨粉末而制成的材料，一般$w(\mathrm{Cu})$为2%。

热处理。用于形成预合金粉末锻压材料性能的热处理有三种：表面渗碳、假(坯料)渗碳和整体硬化(调质)。

表面渗碳用于心部名义含碳量(质量分数)为0.20%~0.25%的材料。假渗碳是为了产生一种与表面渗碳的试样心部相似的显微组织。当$w(\mathrm{C})$为0.20%~0.25%时，可以使其心部硬度为45~55HRC。

调质用于在锻压的全部含碳量范围里取得的整体淬硬的显微组织。在175℃(350℉)的低温回火或消除应力可以为$w(\mathrm{C})$为0.4%及其以上的材料形成55~65HRC的心部硬度。此外，较高温度的回火是为了在这些较高碳的试样里取得45~55HRC和25~30HRC的心部硬度。

淬硬性。图2.5-23所示是P/F-4600、P/F-4200和Fe-Cu-C的顶端淬火曲线。试验按照ASTM A255进行。试件是用在游离氨气氛及1120℃(2050℉)里烧结后，经镦锻而成的锻坯加工得到。

拉伸、冲击和疲劳性能。拉伸性能是用标准长度25mm(1in)和标准直径6.35mm(0.25in)的试件测试得到的。实验室按照标准ASTM E8使用0.5mm/min(0.02in/min)的横梁速度进行。室温冲击试验是用标准夏比V形缺口试件按照标准ASTM E23进行。交变

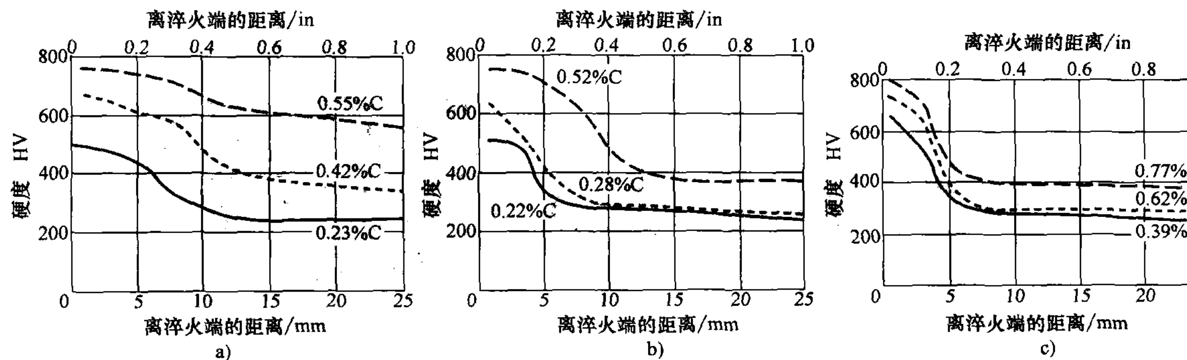


图 2.5-23 不同锻造含碳量下的顶端淬火曲线。按 30kg 载荷的维氏硬度测定

a) P/F-4600 b) P/F-4200 c) Fe-Cu-C

弯曲疲劳(RBF)试验是在单一载荷、悬臂、交变疲劳试验机上进行的。不同材料的拉伸、冲击和疲劳的试验数据如表 2.5-8 ~ 表 2.5-10 所示。

表 2.5-8 P/F-4600 材料的力学性能和疲劳数据

锻压模式	碳（%）	氧 ppm	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm（1in）长的伸长率（%）	断面收缩率（%）	室温夏比V形缺口冲击吸收功		心部硬度 HV30	疲劳极限		疲劳极限与抗拉强度之比
			MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf · ft		MPa	ksi	
假（坯料）渗碳														
镦制	0.24	230	1565	227	1425	207	13.6	42.3	16.3	12.0	487	565	82	0.36
二次压制	0.24	210	1495	217	1325	192	11.0	34.3	12.9	9.5	479	550	80	0.37
镦制①	0.22	90	1455	211	1275	185	14.8	46.4	22.2	16.4	473	550	80	0.38
二次压制①	0.25	100	1455	211	1280	186	12.5	42.3	16.8	12.4	468	510	74	0.36
镦制②	0.28	600	1585	230	1380	200	7.8	23.9	10.8	8.0	513	590	86	0.37
二次压制②	0.24	620	1580	229	1305	189	6.8	16.9	6.8	5.0	464	455	66	0.29
淬火和应力消除														
镦制	0.38	270	1985	288	1505	218	11.5	33.5	11.5	8.5	554	—	—	—
二次压制	0.39	335	1960	284	1480	215	8.5	21.0	8.7	6.4	—	—	—	—
镦制	0.57	275	2275	330	—	—	3.3	5.8	7.5	5.5	655	—	—	—
二次压制	0.55	305	1945	282	—	—	0.9	2.9	8.1	6.0	—	—	—	—
镦制	0.79	290	940	136	—	—	—	—	1.4	1.0	712	—	—	—
二次压制	0.74	280	1055	153	—	—	—	—	2.4	1.8	—	—	—	—
镦制	1.01	330	800	116	—	—	—	—	1.3	1.0	672	—	—	—
二次压制	0.96	375	760	110	—	—	—	—	1.6	1.2	—	—	—	—
调质														
镦制③	0.38	230	1490	216	1340	194	10.0	40.0	28.4	21.0	473	—	—	—
二次压制③	—	—	1525	221	1340	194	8.5	32.3	—	—	—	—	—	—
镦制④	0.60	220	1455	211	1170	170	9.5	32.0	13.6	10.0	472	—	—	—

（续）

锻压模式	碳（%）	氧 ppm	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm（1in）长的伸长率（%）	断面收缩率（%）	室温夏比V形缺口冲击吸收功		心部硬度HV30	疲劳极限		疲劳极限与抗拉强度之比
			MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft		MPa	ksi	
调质														
二次压制④	—	—	1550	225	1365	198	7.0	23.0	—	—	—	—	—	—
镦制⑤	0.82	235	1.545	224	1380	200	8.0	16.0	8.8	6.5	496	—	—	—
二次压制⑤	—	—	1560	226	1340	194	6.0	12.0	—	—	—	—	—	—
镦制⑥	1.04	315	1560	226	1280	186	6.0	11.8	9.8	7.2	476	—	—	—
二次压制⑥	—	—	1480	215	1225	178	6.0	11.8	—	—	—	—	—	—
镦制⑦	0.39	260	825	120	745	108	21.0	57.0	62.4	46.0	269	—	—	—
镦制⑦	0.58	280	860	125	760	110	20.0	50.0	44.0	32.5	270	—	—	—
镦制⑧	0.80	360	850	123	600	87	19.5	46.0	24.4	18.0	253	—	—	—
镦制⑨	1.01	320	855	124	635	92	17.0	38.0	13.3	9.8	268	—	—	—

注：若无注明均为1120℃或2050℉的游离氨中烧结。

①在1260℃（2300℉）的游离氨中烧结。 ②在1120℃（2050℉）吸热气体的气氛中烧结。 ③370℃（700℉）回火。 ④440℃（825℉）回火。 ⑤455℃（850℉）回火。 ⑥480℃（900℉）回火。 ⑦680℃（1255℉）回火。 ⑧695℃（1280℉）回火。 ⑨715℃（1320℉）回火。

表2.5-9 P/M-4200材料的力学性能和疲劳数据

锻压模式	碳（%）	氧/ppm	抗拉强度		0.2%相对屈服强度		25mm（1in）长的伸长率（%）	断面收缩率（%）	心部硬度 HV30
			MPa	ksi	MPa	ksi			
假渗碳									
镦制①	0.19	450	1205	175	—	—	10.0	37.4	390
二次压制①	0.23	720	1110	161	—	—	6.3	17.0	380
镦制②	0.25	130	1585	230	—	—	13.0	47.5	489
二次压制②	0.25	110	1460	212	—	—	11.3	36.1	466
淬火和应力消除									
镦制①	0.31	470	1790	260	—	—	9.0	27.3	532
二次压制①	0.32	700	1745	253	—	—	4.0	9.0	538
镦制①	0.54	380	2050	297	—	—	1.3	—	694
二次压制①	0.50	520	2160	313	—	—	2.0	—	653
镦制②	0.65	120	1605	233	—	—	—	—	710
二次压制②	0.67	130	1040	151	—	—	—	—	709
镦制①	0.73	270	1110	161	—	—	—	—	767
二次压制①	0.85	370	1345	195	—	—	—	—	727
镦制①	0.70	420	600	87	—	—	—	—	761
二次压制①	0.67	320	540	78	—	—	—	—	778
镦制②	0.91	120	910	132	—	—	—	—	820
二次压制②	0.86	120	840	122	—	—	—	—	825

（续）

锻压模式	碳(%)	氧/ppm	抗拉强度		0.2%相对屈服强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	心部硬度 HV30
			MPa	ksi	MPa	ksi			
调质									
镦制③	0.28	720	1050	153	895	130	10.6	42.8	336
镦制②	0.37	1200	1450	210	1385	201	10.2	33.0	447
镦制④	0.56	580	1680	244	7560	226	9.8	28.6	444
镦制⑤	0.70	760	1805	262	1565	227	5.0	11.8	531
镦制⑥	0.86	790	1425	207	1310	190	10.4	30.0	450
镦制⑦	0.26	920	835	121	705	102	22.6	57.6	269
镦制⑧	0.38	860	860	125	785	114	20.8	56.5	288
镦制⑨	0.55	840	917	133	820	119	17.8	49.5	305
镦制⑩	0.73	820	965	140	855	124	15.4	42.7	304
镦制⑩	0.87	920	995	144	850	123	15.6	33.9	318

①在1120℃(2050℉)游离氨中烧结。 ②在1260℃(2300℉)游离氨中烧结。 ③170℃(350℉)回火。 ④315℃(600℉)回火。 ⑤345℃(650℉)回火。 ⑥425℃(800℉)回火。 ⑦620℃(1150℉)回火。 ⑧650℃(1200℉)回火。 ⑨660℃(1225℉)回火。 ⑩675℃(1250℉)回火。

表2.5-10 铁-铜-碳合金的力学性能和疲劳数据（在1120℃或2050℉的游离氨中烧结，在游离氨中再次加热至980℃或1800℉，然后锻造）

锻压模式	碳(%)	氧/ppm	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	室温夏比V形缺口冲击吸收功		心部硬度HV30	疲劳极限		疲劳极限与抗拉强度之比
			MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft		MPa	ksi	
镦制①	0.39	250	670	97	475	69	15	37.8	4.1	3.0	228	—	—	—
镦制②	0.40	210	805	117	660	96	12.5	38.3	5.4	4.0	261	325	47	0.40
二次压制①	0.39	200	690	100	490	71	15	35.4	2.7	2.0	227	—	—	—
二次压制②	0.41	240	795	115	585	85	10	36.5	4.1	3.0	269	345	50	0.43
镦制①	0.67	170	840	122	750	109	10	22.9	2.7	2.0	267	—	—	—
镦制②	0.66	160	980	142	870	126	15	24.9	4.1	3.0	322	470	68	0.48
二次压制①	0.64	190	825	120	765	111	10	24.8	3.4	2.5	266	—	—	—
二次压制②	0.67	170	985	143	875	127	10	20.6	4.7	3.5	311	460	67	0.47
镦制①	0.81	240	1025	149	625	91	10	19.2	2.7	2.0	337	—	—	—
镦制②	0.85	280	1130	164	625	91	10	16.6	4.1	3.0	343	525	76	0.46
二次压制①	0.81	200	1040	151	640	93	10	16.2	2.7	2.0	335	—	—	—
二次压制②	0.82	220	1170	170	745	108	10	12.8	2.7	2.0	368	475	69	0.41

①静止空气中冷却。 ②吹风中冷却。

Fe-Cu-C合金从奥氏体化温度845℃(1550℉)的冷却，可以用静止空气冷却，也可以用吹风冷却。奥氏体化的温度会影响心部硬度。这些Fe-Cu-C合金常用加入硫化锰来提高其切削性能。表2.5-11所示是

加入0.35%(质量分数)硫化锰的与不加入硫化物的这种材料的拉伸、冲击和疲劳性能的比较。表中还包括了含有硫化锰试样和经过硫化处理的粉末试样的试验结果比较。硫化锰的加入对抗拉强度没有什么影响，而硫化处理却会使拉伸性能下降。

孔隙率对力学性能的影响。上一节所总结的力学性能数据与热二次压制或经热镦锻的无孔隙材料有关。密度对力学性能的一般影响如表2.5-12所示。

表2.5-11 添加硫的铁-铜-碳合金的力学性能和疲劳特性(在温度为1120℃(2050℉)游离氨中烧结并锻造)

锻压模式	碳(%)	氧/ppm	硫(%)	抗拉强度		0.2%相对屈服强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	室温夏比V形缺口冲击吸收功		心部硬度HV30	疲劳极限		疲劳极限与抗拉强度之比
				MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft		MPa	ksi	
硫化锰	0.59	270	0.13	915	133	620	90	11	23.2	6.8	5.0	290	430	62	0.47
硫化	0.63	160	0.14	840	122	560	81	12	21.4	6.8	5.0	267	415	60	0.50
无	0.66	160	0.013	980	142	870	126	15	24.9	4.1	3.0	322	470	68	0.48

表2.5-12 在两种温度下的P/F-4600热二次压制的拉伸和冲击性能

二次压制温度		二次压制应力		二次压制密度		0.2%条件屈服强度		抗拉强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度HV30	夏比V形缺口冲击吸收功	
℃	℉	MPa	ksi	g/cm³	lb/in³	MPa	ksi	MPa	ksi				J	lbf·ft
870	1600	406	59	7.65	0.276	1156	168	1634	237	2.6	2.8	519	2.9	2.13
870	1600	565	82	7.72	0.279	1243	180	1641	238	2.1	2.8	538	2.8	2.06
870	1600	741	107	7.18	0.281	1316	191	1702	247	2.4	2.4	564	3.1	2.29
870	1600	943	137	7.79	0.282	1349	196	1705	248	2.3	2.4	562	3.5	2.58
1120	2050	344	50	7.83	0.283	1364	198	1750	254	6.4	20.5	549	6.8	5.01
1120	2050	593	86	7.86	0.2840	1450	210	1777	258	6.7	17.3	566	6.2	4.57
1120	2050	856	124	7.87	0.2844	1592	231	1782	259	5.3	14.1	565	6.2	4.57
1120	2050	981	142	7.87	0.2844	1502	218	1788	260	5.5	12.3	572	6.0	4.42

金属注射模压

工艺步骤。金属注射模压(MIM)工艺把金属材料的结构优势与塑性注射模压技术所具有的形状复杂性结合起来。制备粉末与粘结剂均质混合，并将其注射入一个模型里。MIM粉末颗粒的典型形状为球形，其颗粒大小远远小于用于常规冷模压实的粉末颗粒(MIM粉末,10~20μm;常规的模具-压实粉末,50~150μm)。所配制用的粘结剂在其注模时，具有特别合适的流变性，而且在模铸步骤结束后粘结剂又易于被抽出。一旦零件从模型里被顶出，就利用溶液萃取或加热(或两者同时)的方法将粘结材料从零件中抽出。零件经过去除粘结的步骤后进行烧结，来完成其工艺过程。烧结温度通常在1260℃(2300℉)以上。由于在MIM的初始材料中含有大量的粘结剂(按体积达40%)，MIM零件的尺寸在烧结过程中大为缩小(沿线收缩高达20%)。因此其尺寸允差不像常规模型压实那么好控制，因此有时需要进行校直或整形。

成本分析。由于原材料(羰基铁和粘结剂)的高成本，MIM工艺比常规模型压制-烧结工艺要贵很多。但是用于注射模压的主要设备(压机)却比大型的P/M压机更为经济。其工装寿命至少300000件。这些因素有助于抵消一些短期付出的材料成本。

成分和性能。表2.5-13所列的是用于生产低合金钢的粉末的成分。作为原料铁粉，与合金元素如镍、钼及碳可以采用预合金粉末和混料的两种形式。

根据初始粉末的细度和烧结温度可以获得全密度的93%~98%。95%~96%密度的MIM低合金钢的最低和典型的力学性能如表2.5-14所示。从表中可看出，MIM制成的零件的塑性是非常高的，并且伸长率可达30%甚至更高。

表 2.5-13　MIM 低合金钢的化学成分

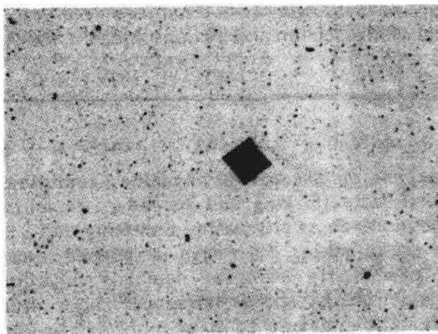
材料代号	成分(最小至最大)(质量分数,%)				
	Fe	Ni	Mo	C	其他
MIM-4600	94.90～98.50	1.5～2.5	0.0～0.5	0.0～0.1	0.0～2.0
MIM-4650	94.40～98.10	1.5～2.5	0.0～0.5	0.4～0.6	0.0～2.0
MIM-2700	88.90～93.50	6.5～8.5	0.0～0.5	0.0～0.1	0.0～2.0

表 2.5-14　MIM 低合金钢的力学性能

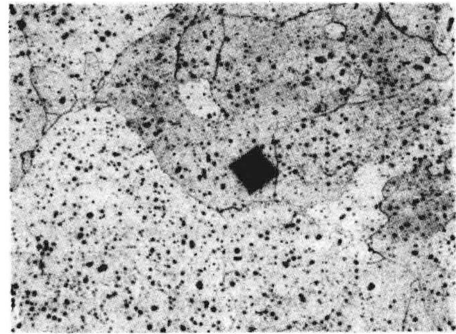
材料代号/状态	最小值					典型值						
	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)(%)	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	密度/(g/cm³)	表观硬度①
	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi			
MIM-4600/烧结	255	37	110	16	20.0	290	42	125	18	40	7.6	45HRB
MIM-4650/烧结	380	55	170	25	11.0	440	64	205	30	15	7.5	62HRB
MIM-4650/调质	1480	215	1310	190	<1.0	1655	240	1480	215	2	7.5	48HRC (55HRC)
MIM-2700/烧结	380	55	205	30	20.0	415	60	255	37	26	7.6	69HRB

①若需要，括号里的是基体的(经换算)硬度。
引自：MPIF 标准 35《金属注射模压成形零件的材料标准》，1993—1994 版。

图 2.5-24a 为低碳铁加上 2% Ni(质量分数)钢试件未经腐蚀的金相照片，所显示的是典型的注射模压成形零件的孔隙组织。由于所用的粉末非常细，故留下的孔隙也很小且相互隔离，而且没有相连的孔隙率。图 2.5-24b 所示是经过腐蚀的同一视场，显示出由腐蚀而造成的典型孔隙放大。没有迹象表明在渗碳体组织里存在着原始金属的颗粒。由于相连的孔隙率非常低(或者不存在)，故在镀层以前不必进行树脂浸渍，而在渗碳过程中严密控制其渗碳层的深度是可行的。



a)



b)

图 2.5-24　在 MIM 处理的镍钢(97%密度)的细小均匀分布的孔隙
a) 未经腐蚀，100×　b) 用 10% 的过硫酸铵腐蚀。显示出具有晶界的铁素体。100×

精选参考文献

- R.M. German and A. Bose, *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, 1997.
- W.B. James, M.J. McDermott, and R.A. Powell, Powder Forging, *Forming and Forging*, Vol 14, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 188–211.
- H.A. Kuhn and B.L. Ferguson, *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, 1990.
- *Powder Metallurgy Design Manual*, Metal Powder Industries Federation, 1995.

第6章　工　具　钢

本章内容由《ASM 特种手册》，工具材料，1995，10～20、21～31、119～153以及383～395页的内容精简而成。其他有关内容还可查阅本章末所列的精选参考文献。

工具钢是指一切用于制造通过切削、成形或其他方法，将材料加工成适合特定用途的零件或机件的工具的钢。早期的工具钢比较简单，即普通碳素钢，但从1868年到20世纪早期，陆续开发出许多复杂的高合金钢。在这些工具钢所含有的各种元素中，含量较大的有钨、钼、钒、锰和铬，这些合金元素使工具钢有可能满足日益严酷的使用要求、较大的尺寸控制及在热处理过程中防止裂纹产生。许多合金工具钢也可应用于一些必须满足严格要求的机器零件和结构用途，例如高温弹簧、超高强度紧固件、特种阀以及用于高温的各类轴承。

在使用中，大部分的工具都要在高速下承受极高的载荷，而且这些工具还要经受非常多次的这种载荷而不会开裂、过度的磨损和变形。在许多用途里，工具钢还必须在工具产生高温的条件下保持这种能力。没有一种单一的材料可以将最大耐磨性、韧性以及在高温下保持硬度的这些性能都结合在一起。因此，针对一定的用途选择合适的材料，常需要对性能的优化组合进行权衡。

大部分的工具钢都是锻压产品，但精密铸件在某些用途里具有其优势。粉末冶金技术也可用于制造工具钢。首先，它能促使在大截面里形成大小及分布都比较均匀的碳化物；第二，它能形成一些特殊成分，而这些成分难以甚至不可能通过对铸造产品的熔化、浇铸，进而机械变形加工来实现。

作为一般性的锻压工具钢，为了保证其最终制品的清洁度和均质性，不仅要对其生产原料（包括废钢）的合金含量进行筛选，而且要对其特性进行仔细筛选。工具钢一般都用小吨位的电弧炉进行熔化，以此经济地实现其成分限量、清洁度以及熔化条件的精确控制。采用特殊钢包熔炼和二次重熔工艺，如电渣重熔和真空电弧重熔工艺都可以满足工具钢在质量和效能方面特别严格的要求。许多中至高合金含量的工具钢都需要对锻造和轧制工艺进行精心控制，否则常会造成大量的工艺废品。半成品和成品棒料的生产过程中要进行在线和最终检验。这些检验的范围很广，包括棒料两端的宏观组织（腐蚀质量）、清洁度、硬度、晶粒大小、退火组织以及淬硬能力。此外，还要求对棒料的整体作磁粉和超声检测，用于探测表面和内部的缺陷。重要的是成品工具钢棒料要将脱碳仔细控制到最低限度，为此要求按照严密控制的特殊步骤对其进行退火。

如此精确的生产工艺和严密的质量控制也像它们所含有的昂贵合金元素一样，都促成了工具钢的高昂成本。然而生产这类特种钢所坚持的质量要求是合理的，因为工具钢棒料制成的复杂切削刀具和成形模具的价值要比其钢本身的成本高出许多倍。虽然某些标准结构合金钢具有与工具钢相似的成分，但是却很少能作为昂贵的工具使用，因为它们一般并不按照工具钢那样的严格质量标准进行生产。

工具在使用中的性能取决于工具的正确设计及其制造精度、工具钢性能的选用以及热处理的使用得当。只有当所有这四方面的要求都得到满足，工具才能成功地得以应用。

分类与特征

表2.6-1列出最为常用的锻压工具钢的成分极限值。每一组具有相似成分和性能的工具钢都标以一个大写的字母，在每一组里的各种工具钢均以编码命名。

工具钢可按不同的标准生产，包括几种ASTM技术指标。由钢铁协会出版的《钢制产品手册》中也包括工具钢（参考文献[1]），里面所包括的基本上代表了大多数工具钢制造商常规生产工艺的许多十分有用的主要技术参数。为达到一定的商业目的，个别商家或客户常提出更为严格的化学和/或冶金学标准。有一些适用的工具钢标准规范如ASTM A600、A681及A686可以作为采购依据使用。ASTM A600规定钨和钼高速钢标准的要求，A681应用于热形变加工、冷形变加工、耐冲击、特种用途以及模具的钢，而A686针对的是水淬工具钢。然而在很多情况里，工具钢还是按照其商业名称购买的，因为用户发现向某一生产厂家买的特定工具钢，在其用途里的性能往往优于由其他供应商提供的同样AISI型号级别的工具钢。

表 2.6-1 主要类型高速钢的成分极限值

代号		化学成分[①]（质量分数,%）								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
钼高速钢										
M1	T11301	0.78 ~ 0.88	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.50	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	8.20 ~ 9.20	1.40 ~ 2.10	1.00 ~ 1.35	—
M2	T11302	0.78 ~ 0.88, 0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	4.50 ~ 5.50	5.50 ~ 6.75	1.75 ~ 2.20	—
M3，等级 1	T11313	1.00 ~ 1.10	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	4.75 ~ 6.50	5.00 ~ 6.75	2.25 ~ 2.75	—
M3，等级 2	T11323	1.15 ~ 1.25	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	4.75 ~ 6.50	5.00 ~ 6.75	2.75 ~ 3.75	—
M4	T11304	1.25 ~ 1.40	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.75	0.30 最高	4.25 ~ 5.50	5.25 ~ 6.50	3.75 ~ 4.50	—
M7	T11307	0.97 ~ 1.05	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.55	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	8.20 ~ 9.20	1.40 ~ 2.10	1.75 ~ 2.25	—
M10	T11310	0.84 ~ 0.94, 0.95 ~ 1.05	0.10 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	7.75 ~ 8.50	—	1.80 ~ 2.20	—
M30	T11330	0.75 ~ 0.85	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.50 ~ 4.25	0.30 最高	7.75 ~ 9.00	1.30 ~ 2.30	1.00 ~ 1.40	4.50 ~ 5.50
M33	T11333	0.85 ~ 0.92	0.15 ~ 0.40	0.15 ~ 0.50	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	9.00 ~ 10.00	1.30 ~ 2.10	1.00 ~ 1.35	7.75 ~ 8.75
M34	T11334	0.85 ~ 0.92	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	7.75 ~ 9.20	1.40 ~ 2.10	1.90 ~ 2.30	7.75 ~ 8.75
M35	T11335	0.82 ~ 0.88	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	4.50 ~ 5.50	5.50 ~ 6.75	1.75 ~ 2.20	4.50 ~ 5.50
M36	T11336	0.80 ~ 0.90	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	4.58 ~ 5.50	5.50 ~ 6.50	1.75 ~ 2.25	7.75 ~ 8.75
M41	T11341	1.05 ~ 1.15	0.20 ~ 0.60	0.15 ~ 0.50	3.75 ~ 4.50	0.30 最高	3.25 ~ 4.25	6.25 ~ 7.00	1.75 ~ 2.25	4.75 ~ 5.75
M42	T11342	1.05 ~ 1.15	0.15 ~ 0.40	0.15 ~ 0.65	3.50 ~ 4.25	0.30 最高	9.00 ~ 10.00	1.15 ~ 1.85	0.95 ~ 1.35	7.75 ~ 8.75
M43	T11343	1.15 ~ 1.25	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 0.65	3.50 ~ 4.25	0.30 最高	7.50 ~ 8.50	2.25 ~ 3.00	1.50 ~ 1.75	7.75 ~ 8.75
M44	T11344	1.10 ~ 1.20	0.20 ~ 0.40	0.30 ~ 0.55	4.00 ~ 4.75	0.30 最高	6.00 ~ 7.00	5.00 ~ 5.75	1.85 ~ 2.20	11.00 ~ 12.25
M46	T11346	1.22 ~ 1.30	0.20 ~ 0.40	0.40 ~ 0.65	3.70 ~ 4.20	0.30 最高	8.00 ~ 8.50	1.90 ~ 2.20	3.00 ~ 3.30	7.80 ~ 8.80
M47	T11347	1.05 ~ 1.15	0.15 ~ 0.40	0.20 ~ 0.45	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	9.25 ~ 10.00	1.30 ~ 1.80	1.15 ~ 1.35	4.75 ~ 5.25
M47	T11348	1.42 ~ 1.52	0.15 ~ 0.40	0.15 ~ 0.40	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	4.75 ~ 5.50	9.50 ~ 10.50	2.75 ~ 3.25	8.00 ~ 10.00
M62	T11362	1.25 ~ 1.35	0.15 ~ 0.40	0.15 ~ 0.40	3.50 ~ 4.00	0.30 最高	10.00 ~ 11.00	5.75 ~ 6.50	1.80 ~ 2.10	—

(续)

代号		化学成分①(质量分数,%)								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
钨高速钢										
T1	T12001	0.65~0.80	0.10~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	0.30 最高	—	17.25~18.75	0.90~1.30	—
T1	T12002	0.80~0.90	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	0.30 最高	1.0 最高	17.50~19.00	1.80~2.40	—
T4	T12004	0.70~0.80	0.10~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	0.30 最高	0.40~1.00	17.50~19.00	0.80~1.20	4.25~5.75
T5	T12005	0.75~0.85	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~5.00	0.30 最高	0.50~1.25	17.50~19.00	1.80~2.40	7.00~9.50
T6	T12006	0.75~0.85	0.20~0.40	0.20~0.40	4.00~4.75	0.30 最高	0.40~1.00	18.50~21.00	1.50~2.10	11.00~13.00
T8	T12008	0.75~0.85	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~4.50	0.30 最高	0.40~1.00	13.25~14.75	1.80~2.40	4.25~5.75
T15	T12015	1.50~1.60	0.15~0.40	0.15~0.40	3.75~5.00	0.30 最高	1.00 最高	11.75~13.00	4.50~5.25	4.75~5.25
中级高速钢										
M50	T11350	0.78~0.88	0.15~0.45	0.20~0.60	3.75~4.50	0.30 最高	3.90~4.75	—	0.80~1.25	—
M52	T11352	0.85~0.95	0.15~0.45	0.20~0.60	3.50~4.30	0.30 最高	4.00~4.90	0.75~1.50	1.65~2.25	—
铬热作模具钢										
H10	T10810	0.35~0.45	0.25~0.70	0.80~1.20	3.00~3.75	0.30 最高	2.00~3.00	—	0.25~0.75	—
H11	T20811	0.33~0.43	0.20~0.50	0.80~1.20	4.75~5.50	0.30 最高	1.10~1.60	—	0.30~0.60	—
H12	T20812	0.30~0.40	0.20~0.50	0.80~1.20	4.75~5.50	0.30 最高	1.25~1.75	1.00~1.70	0.50 最高	—
H13	T20813	0.32~0.45	0.20~0.50	0.80~1.20	4.75~5.50	0.30 最高	1.10~1.75	—	0.80~1.20	—
H14	T20814	0.35~0.45	0.20~0.50	0.80~1.20	4.75~5.50	0.30 最高	—	4.00~5.25	—	—
H19	T20819	0.32~0.45	0.20~0.50	0.20~0.50	4.00~4.75	0.30 最高	0.30~0.55	3.75~4.50	1.75~2.20	4.00~4.50
钨热作模具钢										
H21	T20821	0.28~0.36	0.15~0.40	0.15~0.50	3.00~3.75	0.30 最高	—	8.50~10.00	0.30~0.60	—
H22	T20822	0.30~0.40	0.15~0.40	0.15~0.40	1.75~3.75	0.30 最高	—	10.00~11.75	0.25~0.50	—
H23	T20823	0.25~0.35	0.15~0.40	0.15~0.60	11.00~12.75	0.30 最高	—	11.00~12.75	0.75~1.25	—
H24	T20824	0.42~0.53	0.15~0.40	0.15~0.40	2.50~3.50	0.30 最高	—	14.00~16.00	0.40~0.60	—
H25	T20825	0.22~0.32	0.15~0.40	0.15~0.40	3.75~4.50	0.30 最高	—	14.00~16.00	0.40~0.60	—

（续）

代号		化学成分①(质量分数,%)								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
钨热作模具钢										
H26	T20826	0.45~0.55②	0.15~0.40	0.15~0.40	3.75~4.50	0.30最高	—	17.25~19.00	0.75~1.25	—
钼热作模具钢										
H42	T20842	0.55~0.70②	0.15~0.40	—	3.75~4.50	0.30最高	4.50~5.50	5.50~6.75	1.75~2.20	—
空淬、中合金、冷变形钢										
A2	T30102	0.95~1.05	1.00最高	0.50最高	4.75~5.50	0.30最高	0.90~1.40	—	0.15~0.50	—
A3	T30103	1.20~1.30	0.40~0.60	0.50最高	4.75~5.50	0.30最高	0.90~1.40	—	0.80~1.40	—
A4	T30104	0.95~1.05	1.80~2.20	0.50最高	0.90~2.20	0.30最高	0.90~1.40	—	—	—
A6	T30106	0.65~0.75	1.80~2.50	0.50最高	0.90~1.20	0.30最高	0.90~1.40	—	—	—
A7	T30107	2.00~2.85	0.80最高	0.50最高	5.00~5.75	0.30最高	0.90~1.40	0.50~1.50	3.90~5.15	—
A8	T30108	0.50~0.60	0.50最高	0.75~1.10	4.75~5.50	0.30最高	1.15~1.65	1.00~1.50	—	—
A9	T30109	0.45~0.55	0.50最高	0.95~1.15	4.75~5.50	1.25~1.75	1.30~1.80	—	0.80~1.40	—
A10	T30110	1.25~1.50③	1.60~2.10	1.00~1.50	—	1.55~2.05	1.25~1.75	—	—	—
高碳、高铬、冷变形钢										
D2	T30402	1.40~1.60	0.60最高	0.60最高	11.00~13.00	0.30最高	0.70~1.20	—	1.10最高	—
D3	T30403	2.00~2.35	0.60最高	0.60最高	11.00~13.50	0.30最高	—	1.00最高	1.00最高	—
D4	T30404	2.05~2.40	0.60最高	0.60最高	11.00~13.00	0.30最高	0.70~1.20	—	1.00最高	—
D5	T30405	1.40~1.60	0.60最高	0.60最高	11.00~13.00	0.30最高	0.70~1.20	—	1.00最高	2.50~3.50
D7	T30407	2.15~2.50	0.60最高	0.60最高	11.50~13.50	0.30最高	0.70~1.20	—	3.80~4.40	—
油淬冷作模具钢										
O1	T31501	0.85~1.00	1.00~1.40	0.50最高	0.40~0.60	0.30最高	—	0.40~0.60	0.30最高	—
O2	T31502	0.85~0.95	1.40~1.80	0.50最高	0.50最高	0.30最高	0.30最高	—	0.30最高	—
O6	T31506	1.25~1.55③	0.30~1.10	0.55~1.50	0.30最高	0.30最高	0.20~0.30	—	—	—
O7	T31507	1.10~1.30	1.00最高	0.60最高	0.35~0.85	0.30最高	0.30最高	1.00~2.00	0.40最高	—

（续）

代号		化学成分[1]（质量分数，%）								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
耐冲击钢										
S1	T41901	0.40~0.55	0.10~0.40	0.15~1.20	1.00~1.80	0.30 最高	0.50 最高	1.50~3.00	0.15~0.30	—
S2	T41902	0.40~0.55	0.30~0.50	0.90~1.20	—	0.30 最高	0.30~0.60	—	0.50 最高	—
S5	T41905	0.50~0.65	0.60~1.00	1.75~2.25	0.50 最高	—	0.20~1.35	—	0.35 最高	—
S6	T41906	0.40~0.50	1.20~1.50	2.00~2.50	1.20~1.50	—	0.30~0.50	—	0.20~0.40	—
S7	T41907	0.45~0.55	0.20~0.90	0.20~1.00	3.00~3.50	—	1.30~1.80	—	0.20~0.30[4]	—
低合金特种工具钢										
L2	T61202	0.45~1.00[2]	0.10~0.90	0.50 最高	0.70~1.20	—	0.25 最高	—	0.10~0.30	—
L6	T61206	0.65~0.75	0.25~0.80	0.50 最高	0.60~1.20	1.25~2.00	0.50 最高	—	0.20~0.30[4]	—
低碳模具钢										
P2	T51602	0.10 最高	0.10~0.40	0.10~0.40	0.75~1.25	0.10~0.50	0.15~0.40	—	—	—
P3	T51603	0.10 最高	0.20~0.60	0.40 最高	0.40~0.75	1.00~1.50	—	—	—	—
P4	T51604	0.12 最高	0.20~0.60	0.10~0.40	4.00~5.25	—	0.40~1.00	—	—	—
P5	T51605	0.10 最高	0.20~0.60	0.40 最高	2.00~2.50	0.35 最高	—	—	—	—
P6	T51606	0.05~0.15	0.35~0.70	0.10~0.40	1.25~1.75	3.25~3.75	—	—	—	—
P20	T51620	0.28~0.40	0.60~1.00	0.20~0.80	0.40~2.00	—	0.30~0.55	—	—	—
P21	T51621	0.18~0.22	0.20~0.40	0.20~0.40	0.50 最高	3.90~4.25	—	—	0.15~0.25	1.05~1.25Al
水淬工具钢										
W1	T72301	0.70~1.50[5]	0.10~0.40	0.10~0.40	0.15 最高	0.20 最高	0.10 最高	0.15 最高	0.10 最高	—
W2	T72302	0.85~1.50[5]	0.10~0.40	0.10~0.40	0.15 最高	0.20 最高	0.10 最高	0.15 最高	0.15~0.35	—
W3	T72305	1.05~1.15	0.10~0.40	0.10~0.40	0.40~0.60	0.20 最高	0.10 最高	0.15 最高	0.10 最高	—

①除了W组以外，钢均含0.25%最高Cu、0.30%最高P和0.03%最高S；W组含0.20%最高Cu、0.025%最高P和0.025%最高S。若按规定，硫可增至0.06%~0.15%，以便提高组A、D、H、M和T钢的切削性。 ②适合几种含碳量的范围。 ③显微组织中不含石墨。 ④可选的。⑤按尾数规定其特定的含碳量范围。

高速钢

高速钢是一种主要用于高速切削用途的工具材料。有两大类高速钢，即 M 组的钼高速钢和 T 组的钨高速钢。在美国，M 组高速钢占据生产的全部高速钢的95%以上。M 组高速钢的分类是由中级高速钢组成的。

M 组和 T 组的工具钢在性能上是相当的。M 组高速钢的主要优点是其较低的初始成本（比相似的 T 组高速钢低大约 40%）。

钼高速钢和钨高速钢在许多其他方面包括淬硬性能都是很相似的。这两类高速钢的典型用途包括所有各种切削刀具，例如钻头、铰刀、立铣刀、铣刀、丝锥和滚刀。一些牌号适用于冷变形加工用途，例如冷镦模具镶块、搓丝模、冲头和落料模。M40 系列钢用于制造能切削新型的极具韧性和高强度的钢的刀具。有关高速钢在刀具用途方面的进一步内容可参阅本手册（下册）第 4 篇第 6 章。

钼高速钢。它含有钼、钨、铬、钒、钴和碳作为其主要合金元素。在同样的硬度下，M 组钢的韧性比 T 组钢的稍大一些。除此之外，两组钢的力学性能都很相近。

M 组钢增加碳和钒的含量可提高其耐磨性。增加钴的含量可提高其热（红）硬性（即某些钢在高至足以发射出可见光谱里红色部分的射线的温度中所具有的防止被软化的能力），但是同时其韧性较低。型号 M2 及 M 组中的其他牌号钢；由于其高合金含量而具有在高温下异乎寻常的抗软化能力（见图 2.6-1）。

M 组钢容易脱碳，而且会在有害的奥氏体化介质中因过热而损坏，因此它们比 T 组钢对淬火条件，特别是奥氏体化温度和气氛更为敏感。对于高钼、低钨的成分尤其如此。

M 组高速钢可以深度硬化。它们必须在低于 T 组的钢硬化温度里进行奥氏体化，以免发生早期熔化。M 组高速钢可以通过在 1175 ~ 1230℃（2150 ~ 2250℉）的温度里的淬火而成为全硬度。

M 组高速钢所能得到的最高硬度随其成分而变。对于低含碳量的，即型号 M1、M2、M10（低碳成分）、M30、M33、M34 和 M36 的最高硬度通常为 65HRC。对于较高含碳量的，包括型号 M3、M4 和 M7 的最高硬度大约为 66HRC。对高含碳量的含钴钢，即 M41、M42、M43、M44 和 M46 的最高硬度为 69 ~ 70HRC。然而，如此硬度的 M40 系列钢的工业用途颇为少见。通常利用热处理将硬度调整为 66 ~ 68HRC。

钨高速钢。它含有钨、铬、钒、钴和碳作为其主要合金元素。T1 的开发有一部分要归功于泰勒（Taylor）和怀特（White）的努力，他们在 20 世纪初期发现某些含有（质量分数）超过 14% W、大约 4% Cr 以及大约 0.3% V 的钢具有热硬性。这种早期的钢种，即 T1 含有（质量分数）大约 0.68% C、18% W、4% Cr 和 0.3% V。到了 1920 年，w(V)增加到大约 1.0%。又过了些年，含碳量逐渐提高到现在的水平，对于大部分的钢，w(C)约为 0.75%。

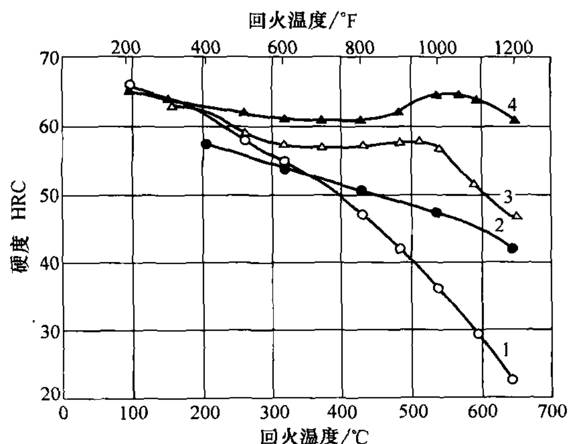


图 2.6-1 四种典型工具钢的硬度随回火温度而变化。图示均为在某温度 1h 的曲线。曲线 1 表示随回火温度的升高，较低的抗软化能力，如 W 组和 O 组钢所展现的变化。曲线 2 表示中等的抗软化能力，如 S1 工具钢所展现的变化。曲线 3 和曲线 4 分别表示较高和非常高的抗软化能力，如经二次硬化的 A2 和 M2 工具钢所展示的变化

T 组高速钢是以其热硬性和耐磨性为特点的。其截面的深度硬化达厚度或直径 75μm（3in），利用油淬或熔盐淬，硬度达 65HRC 或更高。高合金和高碳含量能生成大量的硬的耐磨碳化物的显微组织，尤其当含量（质量分数）超过 1.5% V 和 1.0% C 的钢。w(C)约为 1.55% 的型号 T15 钢，是该组中最为耐磨的钢。

优良的耐磨性与高热硬性的结合使得 T 组高速钢适合在许多高性能的切削刀具上的应用。其韧性使之能在精密刀具上和断续切削的用途中有较好的使用性能。T 组高速钢主要应用于切削刀具，例如车刀、钻头、铰刀、丝锥、拉刀、铣刀和滚刀。这种钢还能应用于制作模具、冲头和重载以及高温的结构零件，如飞机轴承和泵件。

当 T 组高速钢按推荐的硬化温度 1205 ~ 1300℃（2200 ~ 2375℉）进行淬火时，就可以淬硬其深度。它们很少被用于制成截面尺寸大于 75mm（3in）的硬化工具。即使非常大的切削刀具如直径为 75mm 和 100（3 和 4in）的钻头，也只需硬化相对较小的有效截

面。一些大直径的实心工具可以用T组高速钢制造，包括直径大至100～125mm(4～5in)的拉刀和冷挤压冲头。

表面和心部的硬度差随棒料的尺寸而变。某一特定工具的截面尺寸和总体质量，会对其一定的淬火热处理结果产生影响，这种影响等于甚至超过选择工具钢牌号所产生的影响。对于特别大直径或截面的工具，常用的办法就是采用加速油淬以此达到全硬度。这种方法获得的硬度比通过热盐浴淬火或空气冷却(通常只能使直径小于75mm或3in的工具得到全硬度)获得的硬度仅仅高出1～2HRC，但在已经如此高硬度之上再增加这点洛氏硬度也是十分可观的。

钨高速钢的最高硬度随其含碳量而变，但是其随合金含量而变的程度相对较小。任何一种高速钢都能至少形成64.5HRC的硬度。而高含碳量和高碳化物的高速钢，如T15的硬度可达到67HRC。

热作模具钢

有许多加工工序都少不了在高温中进行金属的冲压、剪裁和成形。热作模具钢(H组)能经受热、压以及同上述工序有关的磨料磨损的结合。

H组工具钢通常有中等的含碳量(w(C)为0.35%～0.45%)和含量(质量分数)为6%～25%的铬、钼及钒。这种钢又分为三个子类：铬热作模具钢(型号H10至H19)、钨热作模具钢(型号H21至H26)和钼热作模具钢(型号H42和H43)。

铬热作模具钢(型号H10至H19)。由于其中等的含铬量以及如钼、钨和钒作为碳化物形成元素的加入，它们具有优良的抗热软化能力。低含碳量和低合金总含量能提高其在通常40～55HRC的工作模具硬度下的韧性。较高的钨和钼含量可提高其热强度，但韧性略有降低。钒的加入可提高其高温下的抗冲蚀(侵蚀性磨损)的能力。增加硅的含量可增强在高达800℃(1475℉)下的抗氧化能力。最常用的这组钢为H11、H12、H13，以及用得较少一些的H19。

所有铬热作模具钢都采用深度硬化。H11、H12和H13钢均可空气硬化到全变形加工硬度，其截面达150mm(6in)。其余的H组钢则可空气硬化，其截面尺寸大至305mm(12in)。空气硬化的特性和这种钢合金含量的均衡导致在硬化过程中的扭曲变形的减少。铬热作模具钢特别适合用于所有各种热变形加工模，尤其是铝、镁挤压模，以及压铸模、锻模、轴胎和热剪。这些钢中的大部分所含合金和碳的量都很低，以致用于制造的工具在使用中能够用水冷而不至于发生开裂。

H11工具钢及其合金改进型都可用于制造某些高应力的结构零件，特别是在航天技术里。能满足这种使用要求的材料需用真空电弧炉重熔，由此获得极低的残余气体含量、极高的显微清洁度和高度的结构均质性。

比较常规的高强度钢H11的主要优点就是它具有在持续处于高达540℃(1000℉)中的抗软化能力，并且当其室温抗拉强度为1720～2070MPa(250～300ksi)时，还具有中等程度的韧性和塑性。此外，H11因为其二次硬化特征而能够进行高温回火，从而能几乎完全消除残余硬化应力，这对于在高强度的水平上保持其最高韧性是非常必要的。在结构和热变形加工的用途里，H11、H12和H13钢的其他重要优点包括易于成形和加工、优良的焊接性、相对较低的热膨胀系数、尚可接受的热导性以及高于平均水平的抗氧化和抗腐蚀能力。

钨热作模具钢(型号H21至H26)。钨热作模具钢的主要成分为碳、钨、铬和钒。这些钢的较高合金元素含量造就了它们具有比H11和H13热作模具钢更高的抗高温软化和耐冲蚀的能力。然而，高合金含量也使它们在常规的加工硬度(45～55HRC)下更易于产生脆性，并使它们在使用中还难以安全地进行水淬。

虽然钨热作模具钢能进行空气硬化，但通常还是用油或热盐淬火，以此使产生的氧化皮降低到最低限度。如用空气硬化它们产生的扭曲也小。钨热作模具钢比铬热作模具钢要求较高的硬化温度，故前者也更易于在氧化的气氛中产生氧化皮。

虽然这种钢具有较高的韧性，但它们的许多特性都类似于高速钢。事实上，H26就是一种低碳型的T1高速钢。如果钨热作模具钢在使用之前预热到运行温度，则可使其破裂降低到最低限度。这种钢能用于制造在高温下使用的轴胎和挤压模，例如黄铜、镍合金和钢的挤压，它们还适用于经强化设计的热锻模。

钼热作模具钢。只有两种常用的钼热作模具钢：型号H42和H43。它们含钼、铬、钒、碳和不同量的钨。与钨热作模具钢相似，两者有几乎一样的特征和应用。尽管它们的成分与各种钼高速钢相似，但它们的含碳量较低而韧性较高。相对于钨热作模具钢，H42和H43的主要优点在于其较低的初始成本。与钨热作模具钢相比，它们具有较高的耐热裂性，但与所有的高钼钢一样，它们需要在热处理时格外小心，特别是对于脱碳和奥氏体化温度的控制。

专用热作工具钢

有许多可以用于热锻模座和模块的专用低合金钢牌号。如表2.6-2所示，这些钢中的主要合金元素为镍、钼和铬，再加入少量的钒和硅。其总合金含量一般保持足够低，以使这些牌号钢的模块经预硬化后还能保留适当的切削性能。这类钢是以高韧性为特征的，有时还有良好的耐热性以及非常好的淬硬性。为权衡得到良好的韧性，一般将它们热处理到相对较低的硬度。由于这些较低的硬度，它们的耐磨性也只属于中等。然而众所周知，它们具有优良的耐冲击载荷（如在锻锤中所经受的）、热裂和突发性失效的能力。

表2.6-2 专用低合金热变形加工工具钢的名义成分

钢[1]	化学成分（质量分数，%）						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
6G	0.55	0.80	0.25	1.00	—	0.45	0.10
6F2	0.55	0.75	0.25	1.00	1.00	0.30	0.10[2]
6F3	0.55	0.60	0.85	1.00	1.80	0.75	0.10[2]
6F4	0.20	0.70	0.25	—	3.00	3.35	—
6F5	0.55	1.00	1.00	0.50	2.70	0.50	0.10
6F6	0.50	—	1.50	1.50	—	0.20	—
6F7	0.40	0.35	—	1.50	4.25	0.75	—
6H1	0.55	—	—	4.00	—	0.45	0.85
6H2	0.55	0.40	1.10	5.00	1.50	1.50	1.00

①这些钢沿承1948年版的《金属手册》中所用的代号，除了它们前面冠以罗马数字（VIF2等）。无论是AISI还是SAE，都不为这些工具钢标明型号数字，故它们的化学成分可按不同的工艺步骤略有变动。 ②合金元素可选。

由于一般采用低温回火，这种模具钢主要应用于锻打工序中，其间热量借以传递到模具里的接触时间都是很短的。另外，它们也能作为模块用于压机，模具上的耐热镶嵌件都是用热作模具钢（H牌号）制成的。在低合金工具钢的一般应用中的一个特例就是合金6F4（表2.6-2）。其镍和钼的高含量使之具有高硬度和高淬硬性，而且一般它还有待时效处理。为此，当将其用于压机和镦锻机时，所传递的热量可以促其时效硬化，以此提高其耐擦伤磨损的能力。

表2.6-2中所列专用钢的“ASM”代号出处可追溯到1948年版的《金属手册》。国际ASM并不颁布任何标准。然而，由于这些钢也从来未经AISI、SAE或统一编号组织（Unified Numbering System，UNS）给予编号，所以它们通常还是沿袭ASM的代号。在1948年版的手册里，工具钢被分为六大种类。这里所讨论的钢则属于种类VI(6)，即“其他工具钢（Miscellaneous Tool Steels）”。代号里的字母代表主要合金元素。所以，6G是一种铬-钼钢，而6F钢是镍-铬-钼的成分。6F2与6F7的差别在于这些主要合金元素的数量（表2.6-2）。表2.6-2中6H牌号就是1948年版《金属手册》中所用牌号的延续，它与前面所述的铬热变形加工工具钢相类似。

冷作模具钢

冷作模具钢因为不含有能使其形成耐高温软化所必要的合金含量，故其应用仅限于不会连续或反复加热超过205～260℃（400～500℉）的用途。冷作模具钢分为三种：空气硬化钢（A组），高碳、高铬钢（D组）和油淬钢（O组）。

空气硬化、中合金、冷作模具钢（A组）。它们含有足够的合金元素，使其直径达100mm（4in）的截面也能从奥氏体化温度通过空气冷却后获得完全硬化（型号A6，单边尺寸至175mm或7in的立方体，截面完全硬化）。因为接受的是空气硬化，故A组工具钢处理后的扭曲降到最低限度，而硬化的安全性达到最高（开裂的可能性最小）。锰、铬和钼是形成如此深度硬化的主要合金元素。型号A2、A3、A7、A8和A9均含高百分比的铬（5%），由此产生中等程度的抗高温软化的能力（见图2.6-1中的曲线3，所示为型号A2的硬度相对回火温度的关系）。

型号A4、A6和A10的含铬量较低（w(C)为1%）而含锰量较高（w(Mn)为2%）。它们能够按低于高含铬量型号所要求的温度，即约110℃（200℉）进行硬化，于是进一步减少在热处理过程中发生的扭曲

以及不必要的表面反应。

为了提高韧性，在型号 A8 中加入硅和在型号 A9、A10 中加入硅和镍。由于型号 A10 的高碳和高硅含量，故能在其显微组织里发现石墨。结果，A10 在退火状态具有好得多的切削性，并在完全硬化状态下似乎还具有比其他 A 组工具钢更好的抗划伤和咬死的能力。

A 组工具钢的典型应用包括剪刀、冲头、下料模和冲边模、成形模以及压型模。这种钢所具有的尺寸稳定性使之适合制造量具和精密检具。此外，由于 A7 具有特别高的抗磨料磨损的能力，所以它能适用于制造砖模、陶瓷模及其他易擦伤的用途。

存在于 A 组钢里的复合铬或铬-钒碳化物，通过马氏体基体增强其抗磨性。因此，这些钢即使没有完全硬度，也能在磨料磨损的条件下具有很好的工作性能。虽然对于大部分的工具，静止空气的冷却能适合形成完全硬度，但是大截面的工具应当用吹气冷却或用搅拌热油淬火。

高碳、高铬、冷作模具钢（D 组）。它们含有（质量分数）1.50%~2.35% C 和 12% Cr。它们除型号 D3 以外，都含有 1% Mo（质量分数）。除 D3 外，所有 D 组工具钢都是空气硬化并在静止空气中冷却达到完全硬度。而 D3 几乎总是用油淬火（小零件可以在真空里进行奥氏体化，然后用气体淬火）。因此，用 D3 钢制造的工具对于扭曲更加敏感，而且更容易在硬化过程中发生开裂。

D 组工具钢具有很高的抗高温软化的能力。这些钢还具有优异的耐磨性，尤其是型号 D7，它含有最高的含碳量和含钒量。所有的 D 组钢，特别是含碳量较高的型号 D3、D4 和 D7 均含有大量的碳化物，从而使其对刃口脆性较为敏感。

D 组工具钢的典型用途包括能长期使用的下料、成形、滚丝和深拉模具，切片模具，砖模，量具，抛光工具，轧辊以及剪切、纵切的刀片。

油淬冷作模具钢（O 组）。它们有高含碳量并加上足够的其他合金元素；故当将其以奥氏体化的温度在油中淬火时，可实现从小到中等大小的截面的完全硬度。O 组工具钢按合金的型号和含量的不同而不同，尽管它们的一般特性都是相似的，而且有相似的用途。型号 O1 含有锰、铬和钨。型号 O2 的主要合金为锰。型号 O6 含有硅、锰和钼。它有高的总含碳量，其中包括游离碳和充足的化合碳，因而使钢获得最高的淬火后硬度。型号 O7 含有锰和铬，它还含有高于型号 O1 的含钨量。

O 组钢最重要的与使用相关的性能就是常温下的高耐磨性，这是由高含碳量所致。另一方面，O 组钢抗高温软化的能力较差。

O 组钢具有一种全靠其相对缓慢的淬火而获得硬化的能力，借此在其硬化的过程中，产生比以水淬硬化为特征的工具钢更小的扭曲和更大的安全性（不易开裂）。用这种钢制成的工具只要方法对路就能成功地通过焊接进行修补或翻新。此外，型号 O6 的显微组织中的石墨能大大改善其退火毛坯的切削性，并有助于减少完全硬化钢的划伤和咬死。

O 组工具钢广泛地用于制造模具和冲头，并应用于下料、冲边、拉深、折边和成形。经油淬后，再以 175 ~ 315℃（350 ~ 600℉）的温度回火可以获得 56 ~ 62HRC 的表面硬度，于是用型号 O1、O2 或 O6 制造的大部分模具都具有合适的力学性能组合。型号 O7 的淬硬性较差一些，但是一般比 O 组的其他工具钢有更好的耐磨性，所以较多地应用于要求有较为锋利刃口的刀具上。油淬工具钢也能用于制造机器零件（如凸轮、轴瓦和导轨）以及需要有很好的尺寸稳定性、耐磨性的量具。

O 组钢的淬硬性可以通过（Jominy）顶端淬火试验进行有效的检测。O 组钢的淬硬性带如图 2.6-2 所示。

在正常的硬化温度下，O 组钢保留较大量的未溶解碳化物，故硬化达不到像低含碳量钢所能硬化的深度，但是与有合金含量的差不多。另一方面，O 组钢能达到较高的表面硬度。提高硬化温度会增大晶粒大小、增加合金元素的溶解，并溶解更多的过量碳化物，从而提高其淬硬性。然而提高硬化温度会对某些力学性能产生负面影响，最明显的是延伸韧性，还有就是在硬化过程中增加发生开裂的可能性。

耐冲击钢

耐冲击钢也称 S 组钢，所含的主要合金元素为锰、硅、铬、钨和钼，并以不同的含量而组合。对于所有 S 组钢，$w(C)$ 约为 0.50%，形成一种高强度、高韧性以及低至中耐磨性的组合。S 组钢主要用于制造錾子、铆钉模、冲头、旋具头及其他要求高韧性和承受冲击载荷的用途上。型号 S1 和 S7 也用于热冲和剪切，这时要求有一些耐热性。

S 组钢的淬硬性从浅层硬化（S2）到深层硬化（S7）而异。在含有中等合金含量的这些钢中，成分对淬硬性的制约在程度上大于晶粒大小和熔化工艺作为附带影响对其造成的制约，而后者对于 W 组钢来说是非常重要的。为获得最佳硬度，S 组钢要求有相对较高的奥氏体化温度，所以未曾溶解的碳化物并不

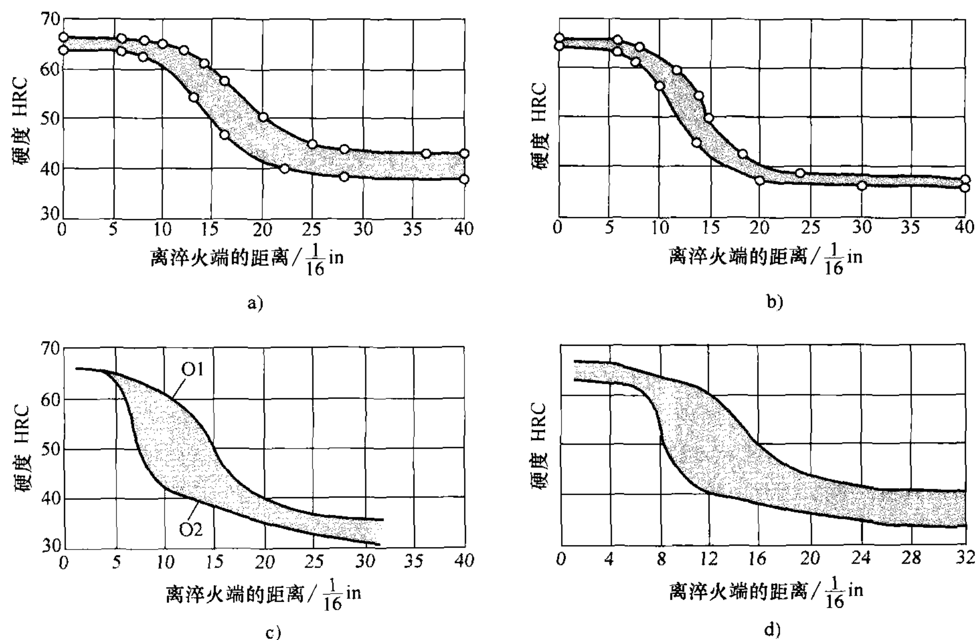


图2.6-2　O组钢的顶端淬火淬硬性带。源自B的淬硬性带代表O1和O2工具钢的5炉次的数据。源自A的数据只是根据平均硬度值测得，而不作为淬硬性带。O6的是原组织经球化的数据。O1和O6是用815℃(1500℉)淬火，而O2是用790℃(1450℉)淬火的

a) O1，源自A　b) O2，源自A　c) O1和O2，源自B　d) O6

是制约淬硬性的因素。型号S2一般都用水淬；型号S1、S5和S6用油淬；而型号S7一般都用空气冷却，除非大截面的用油淬。

S组钢既能有高强度又能展现出优异的韧性，所以它们常被考虑作为非工具或结构上的应用。

低合金特种用途钢

低合金特种用途钢也称为L组钢，它们含有铬、钒、镍和钼。过去曾经可以在这组钢里列出七种钢，可是由于需求减少，现在只剩下L2和L6了。型号L2可以有几种含碳量，w(C)为0.50%~1.10%。它的合金元素主要为铬和钒，由此使之成为细晶粒的油淬钢。型号L6含有少量的铬和钼，以及为提高其韧性而含有的1.50% Ni(质量分数)。

虽然L2和L6都可认为是油淬钢，但大截面的L2钢常用水淬。一种w(C)为0.50%的L2钢，经油淬，硬度可达到约57HRC，但是当截面厚度约大于13mm(0.5in)时，它就无法淬透。w(C)为0.70%的型号L6，在淬火后其硬度可达约64HRC。它能硬化通过截面厚度75mm(3in)，并维持在60HRC以上。

L组钢一般用于机器零件，如主轴、凸轮、卡盘和弹簧夹头以及其他同时要求强度和韧性的特殊用途。

型模钢

型模钢也叫P组钢，它们含有的主要合金元素为铬和镍。型号P2和P6为按工具钢特性标准生产的渗碳钢。它们在退火状态下，有非常低的硬度和很低的耐变形加工硬化。因此有可能采用冷压制阴模法为其加工模具的型腔(压制阴模法就是一种制造模具凹腔的成形技术——先用硬钢复制一个与将要生产的工件形状精确一致的母模,然后将其压入较软的模坯得到所需的凹腔)。型腔成形后，通过渗碳、硬化和回火使其表面硬度达到约58HRC。型号P4和P6都可深度硬化，型号P4可以用空气冷却实现其渗碳层的完全硬化。

型号P20和P21通常按照热处理到30~60HRC的状态供货，即一种易于将其加工成为大型且复杂的压模和注射模的状态。因为这种钢经预硬化而不需要后续的高温热处理，故可免除因此造成的变形和尺寸变化。不过当用于塑料注射模，型号P20有时可以在型腔加工后再进行渗碳和硬化处理。P21是一种含铝的析出硬化钢，按照预硬化到32~36HRC的状态供货。这种钢因为有极好的抛光性，故适合制造粗糙度等级极高的注射模。

所有的P组钢都只有很低的抗高温软化能力，不

过P4和P21属例外，它们具有中等的抗高温软化能力。P组钢几乎无一例外地可用于低温压铸模和注射或压铸的塑料模。塑料模往往要求使用厚度达762mm(30in)，重量达9t(10tons)的钢块。因为这些大型的模块必须满足严格的致密性、清洁度和淬硬性的要求，故电炉熔化、真空脱气和特殊脱氧处理均已成为P组工具钢生产的标准工艺。此外，钢坯的铸造和锻造工艺也已经过改进，而能达到高度的均质性。

水淬钢

水淬钢也称W组钢，它以碳作为其主要合金元素。大部分的W组钢里要加入少量的铬——提高其淬硬性和耐磨性，及少量的钒——保持细晶粒从而提高其韧性。W组工具钢按照不同的名义含碳量(w(C)为接近~0.60%~1.40%)生产，大部分常用牌号的钢中w(C)约为1.00%。

W组工具钢是一种非常浅层的淬硬性钢，因此即使进行剧烈的淬火，也只能形成相对较薄的完全硬化区。厚度超过13mm(1/2in)的截面一般都会在强、韧且富有弹性的心部外面形成一淬硬层。

W组钢的抗高温软化能力很低。它们适合制造冷镦头、锻打、压型和滚花的工具，木加工工具，硬金属切削刀具如丝锥、铰刀，耐磨机床零件，以及刃具。

工具钢的性能

决定工具钢使用功能的基本性能为硬度，耐磨性、变形性和破碎性，韧性，以及在很多情况下还有抗高温软化性。要在由实验室测试得到的工具钢性能与其在使用或制造过程中的功能之间建立可靠的关系是很不容易的，故这些性能通常只是作为一般性的比较而不是特定的参数。表2.6-3和图2.6-3、图2.6-4所示是它们的性能和制造特征的比较。

表2.6-3 工具钢的工艺和使用特性

AISI代号	抗脱碳	硬化和回火				制造和使用			
		硬化深度	扭曲量[①]	抗开裂	大约硬度[②] HRC	切削性能	韧性	抗软化性	耐磨性
钼高速钢									
M1	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	非常高	非常高
M2	中	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	非常高	非常高
M3(等级1和等级2)	中	深	A或S，低；O，中	中	61~66	中	低	非常高	非常高
M4	中	深	A或S，低；O，中	中	61~66	低至中	低	非常高	最高
M7	低	深	A或S，低；O，中	中	61~66	中	低	非常高	非常高
M10	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	非常高	非常高
M30	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	最高	非常高
M33	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	最高	非常高
M34	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	最高	非常高
M35	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	最高	非常高
M36	低	深	A或S，低；O，中	中	60~65	中	低	最高	非常高
M41	低	深	A或S，低；O，中	中	65~70	中	低	最高	非常高
M42	低	深	A或S，低；O，中	中	65~70	中	低	最高	非常高
M43	低	深	A或S，低；O，中	中	65~70	中	低	最高	非常高
M44	低	深	A或S，低；O，中	中	62~70	中	低	最高	非常高
M46	低	深	A或S，低；O，中	中	67~69	中	低	最高	非常高
M47	低	深	A或S，低；O，中	中	65~70	中	低	最高	非常高
M48	低	深	A或S，低；O，中	中	65~70	低	低	最高	最高
M62	低	深	A或S，低；O，中	中	62~68	中	低	最高	非常高

（续）

AISI代号	抗脱碳	硬化和回火				制造和使用			
		硬化深度	扭曲量①	抗开裂	大约硬度② HRC	切削性能	韧性	抗软化性	耐磨性
钨高速钢									
T1	高	深	A或S，低；O，中	高	60～65	中	低	非常高	非常高
T2	高	深	A或S，低；O，中	高	61～66	中	低	非常高	非常高
T4	中	深	A或S，低；O，中	中	62～66	中	低	最高	非常高
T5	低	深	A或S，低；O，中	中	60～65	中	低	最高	非常高
T6	低	深	A或S，低；O，中	中	60～65	低至中	低	最高	非常高
T8	中	深	A或S，低；O，中	中	60～65	中	低	最高	非常高
T15	中	深	A或S，低；O，中	中	63～68	低至中	低	最高	最高
中等高速钢									
M50	低	深	A或S，低；O，中	中	58～63	中	低	高	高
M52	低	深	A或S，低；O，中	中	58～64	中	低	高	高
铬热作模具钢									
H10	中	深	非常低	最高	39～56	中至高	高	高	中
H11	中	深	非常低	最高	38～54	中至高	非常高	高	中
H12	中	深	非常低	最高	38～55	中至高	非常高	高	中
H13	中	深	非常低	最高	38～53	中至高	非常高	高	中
H14	中	深	低	最高	40～47	中	高	高	中
H19	中	深	A，低；O，中	高	40～57	中	高	高	中至高
钨热作模具钢									
H21	中	深	A，低；O，中	高	36～54	中	高	高	中至高
H22	中	深	A，低；O，中	高	39～52	中	高	高	中至高
H23	中	深	中	高	34～47	中	中	非常高	中至高
H24	中	深	A，低；O，中	高	45～55	中	中	非常高	高
H25	中	深	A，低；O，中	高	35～44	中	高	非常高	中
H26	中	深	A或S，低；O，中	高	43～58	中	中	非常高	高
钼热作模具钢									
H42	中	深	A或S，低；O，中	中	50～60	中	中	非常高	高
空气硬化、中合金、冷作模具钢									
A2	中	深	最低	最高	57～62	中	中	高	高
A3	中	深	最低	最高	57～65	中	中	高	非常高
A4	中至高	深	最低	最高	54～62	低至中	中	中	中至高
A6	中至高	深	最低	最高	54～60	低至中	中	中	中至高
A7	中	深	最低	最高	57～67	低	低	高	最高
A8	中	深	最低	最高	50～60	中	高	高	中至高
A9	中	深	最低	最高	35～56	中	高	高	中至高
A10	中至高	深	最低	最高	55～62	中至高	中	中	高

（续）

AISI代号	抗脱碳	硬化和回火				制造和使用			
		硬化深度	扭曲量①	抗开裂	大约硬度② HRC	切削性能	韧性	抗软化性	耐磨性
高碳、高铬、冷作模具钢									
D2	中	深	最低	最高	54~61	低	低	高	高至非常高
D3	中	深	非常低	高	54~61	低	低	高	非常高
D4	中	深	最低	最高	54~61	低	低	高	非常高
D5	中	深	最低	最高	54~61	低	低	高	高至非常高
D7	中	深	最低	最高	58~65	低	低	高	最高
油淬冷作模具钢									
O1	高	中	非常低	非常高	57~62	高	中	低	中
O2	高	中	非常低	非常高	57~62	高	中	低	中
O6	高	中	非常低	非常高	58~63	最高	中	低	中
O7	高	中	O，非常低；W，高	W，低；O，非常高	58~64	高	中	低	中
耐冲击钢									
S1	中	中	中	高	40~58	中	非常高	中	低至中
S2	低	中	高	低	50~60	中至高	最高	低	低至中
S5	低	中	中	高	50~60	中至高	最高	低	低至中
S6	低	中	中	高	54~56	中	非常高	低	低至中
S7	中	深	A，最低；O，低	O，高；A，最高	45~57	中	非常高	高	低至中
低合金特种用途钢									
L2	高	中	O，中；W，低	O，中；W，高	45~63	高	非常高③	低	低至中
L6	高	中	低	高	45~62	中	非常高	低	中
低碳模具钢									
P2	高	中	低	高	58~64③	中至高	高	低	中
P3	高	中	低	高	54~64③	中	高	低	中
P4	高	高	非常低	高	58~64③	低至中	高	中	高
P5	高	—	O，低；W，高	高	58~64③	中	高	低	中
P6	高	—	A，非常低；O，低	高	58~61③	中	高	低	中
P20	高	中	低	高	28~37	中至高	高	低	低至中
P21	高	深	最低	最高	30~40④	中	中	中	中
水淬钢									
W1	最高	浅	高	中	50~64	最高	高⑤	低	低至中
W2	最高	浅	高	中	50~64	最高	高⑤	低	低至中
W3	最高	浅	高	中	50~64	最高	高⑤	低	低至中

①A，空气冷却；B，盐水淬火；O，油淬；S，盐浴淬火；W，水淬火。 ②是这种钢在正常推荐的温度范围里进行回火之后的硬度。 ③渗碳层硬度。 ④510~550℃(950~1025℉)时效之后的硬度。 ⑤随含碳量和硬化深度的加大，韧性降低。

引自参考文献[1]。

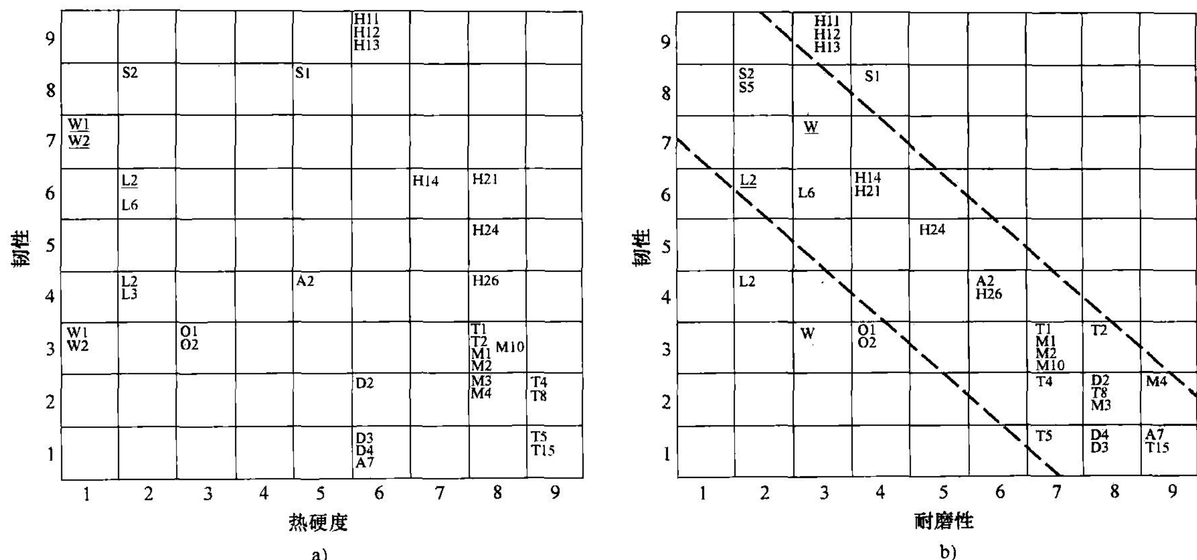


图2.6-3 韧性曲线图，相对于工具钢的热硬度和耐磨性。有下划线的表示浅层硬化工具钢。图b中虚线间的区域表示平均值

a）热硬度 b）耐磨性

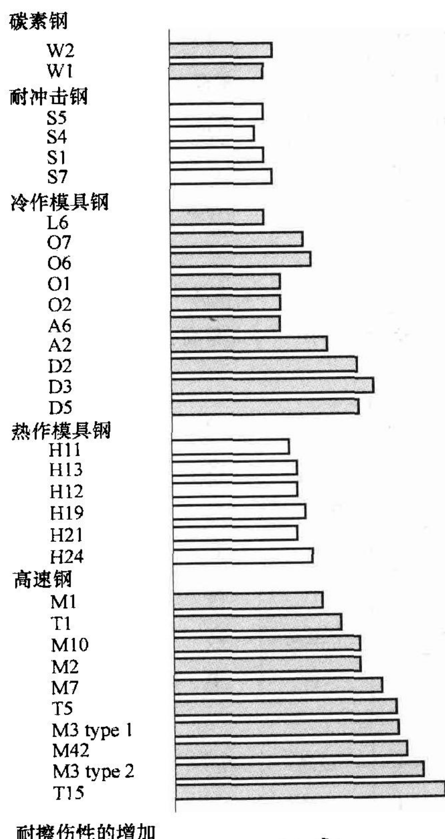


图2.6-4 工具钢的相对耐擦伤性

硬度。它是最普遍的工具钢规定要求，且作为一种工具热处理是否合格的检验。工具钢的力学性能或加工特性常可以用硬度衡量或推算。例如高硬度可提高强度和耐磨性，但会降低韧性。如表2.6-3所示，工具钢硬度最普通的是以洛氏C(HRC)测量和报告的。

热硬度。在高温下，保持高硬度是工具钢用于切削和金属热变形加工用途的一项重要性能。工具钢抗热软化的能力与它形成二次硬化的能力以及显微组织中的特殊相(如过量的合金碳化物)有关。从图2.6-1所示回火曲线中，可以获得有关工具钢抗高温软化能力的有用信息。高温下的硬度测试(表2.6-4)也能提供有用的信息。

图2.6-5所示是在不同温度下的五种热作模具钢的热硬度。所有这些钢都热处理到几乎相同的初始硬度。试件在试验温度里保持30min后测试硬度。除H12外，其他钢在低于约315℃(600℉)的温度下看来，都有几乎相同的热硬度。只有在高于480℃(900℉)时，才会显示出不同的热硬度。

图2.6-6所示是某些热作模具钢在高温中保留10h后的抗软化性。所有这些钢在热处理后有几乎相同的初始硬度。对于所示的模具钢，在低于540℃(1000℉)的温度下，其抗软化性并没有太大的不同。然而，如较长时间地保留在高温里，则高合金热作模具钢，如H19、H21和改进型H10比中合金钢如H11能更好地保持其硬度。

表 2.6-4　所选高速工具钢和模具钢的热硬度

AISI 代号	硬度　HRC				
	室温	热硬度①			
		315℃（600℉）	425℃（800℉）	540℃（1000℉）	650℃（1200℉）
高速工具钢					
M1	65	61	58	54	32
M2	65	62	59	55	36
M3，等级 1	65	63	60	56	36
M3，等级 2	65	63	60	56	36
M4	66	63	60	56	37
M7	65	61	58	54	35
M10	65	60	57	52	33
M30	65	63	58	55	35
M33	65	64	60	57	40
M36	65	64	60	57	40
M42	68	66	65	62	44
M50	64	59	57	52	—
M52	64	60	57	53	—
T1	65	61	57	53	33
T4	65	61	59	55	38
T5	66	62	60	56	40
T15	68	64	61	57	42
冷作模具钢					
A2	60	52	46	35	—
A8	58	55	52	45	—
D2	60	53	47	38	—
D4	62	52	46	37	—
热作模具钢					
A8	58	55	52	45	—
H11	54	49	47	42	22
H12	54	49	47	42	22
H13	55	49	47	42	22
H19	54	51	47	42	31
H21	54	52	49	45	29
H23	41	32	30	28	25
H26	58	54	50	46	31

①小直径的棒料，按推荐的热处理进行试验。

引自参考文献[2]。

耐磨料磨损。经热处理工具钢的高耐磨性应归功于基体相，主要为马氏体的硬度和基体中所保留的不溶解碳化物的数量和类型。碳化物存在的数量和类型又取决于在该牌号钢中碳的整体含量及碳化物形成元素（如铬、钼、钒和钨）的数量。在碳素钢和低合金牌号钢中存在着渗碳体，而在高合金的牌号钢里能发现较为复杂的碳化物类型（表 2.6-5）。碳化物的硬度从渗碳体的大约 800HV 到大约 1400HV，随其成分而改变，此时一部分铁被其他元素如铬所取代。

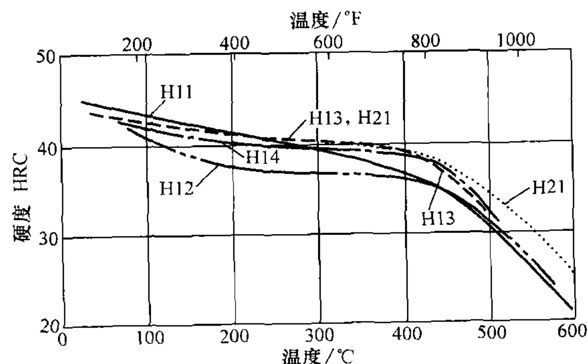


图 2.6-5　AISI 热作工具钢的热硬度。在试验温度里保持 30min 后再进行测量

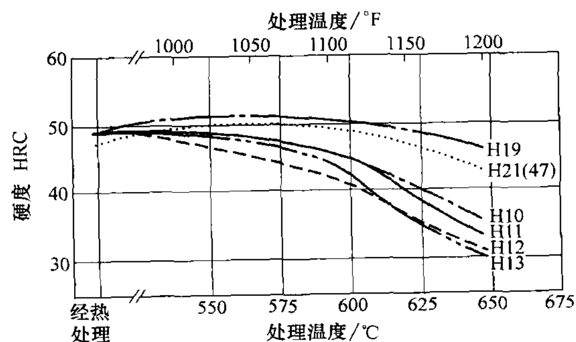


图 2.6-6　AISI 热作工具钢在 10h 的高温处理过程中的抗软化能力，以其室温硬度表征。所有样品的初始硬度均为 49HRC，除了有括号表示的数值

表2.6-5 工具钢里见到的合金碳化物的特征

碳化物类型	晶格类型	注释
M_3C	正交的	这是一种渗碳体(Fe_3C)型的碳化物，可以为Fe、Mn、Cr并带一点W、Mo、V
M_7C_3	六角的	大部分在Cr合金钢中发现。较高温度里不易溶解。硬且耐磨料磨损，在回火高速钢产品中发现
$M_{23}C_6$	面心立方的	存在于高Cr钢和所有高速钢。Cr可以用Fe替代形成W、Mo的碳化物
M_6C	面心立方的	是一种富W或Mo的碳化物。可含中等含量的Cr、V和Co。存在于所有高速钢里。特别耐磨料磨损
M_2C	六角的	W_2C型的富W或Mo的碳化物。形成于回火。可以溶解相当多的Cr
MC	面心立方的	富钒碳化物。不易溶解。少量能溶解的在二次硬化中再次析出

引自参考文献[3]。

图2.6-7所示为比较与马氏体和渗碳体(Fe_3C)有关的各种合金碳化物的硬度。如图所示，析出的金属碳化物，如MC和M_2C可达到非常高的硬度，其明显的耐磨性要归功于合金化工具钢所含的大体积比例碳化物。例如，高速工具钢可以含有体积高达30%的碳化物，它们由MC、$M_{23}C_6$和M_6C组成。

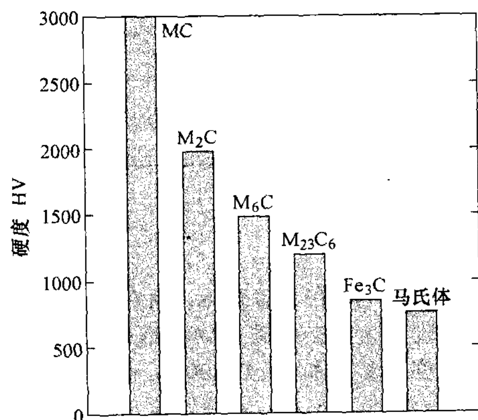


图2.6-7 高速钢中合金碳化物、渗碳体和马氏体的相对硬度。引自参考文献[4]

布丁斯基(Budinski)根据对干磨料磨损所作的一项详细研究(参考文献[5])表明，其数据分析结果与结构性参数A具有非常好的相关性，这里，A等于初始碳化物尺寸与碳化物的体积比的乘积，再乘以碳化物硬度。其数据如图2.6-8所示。这个结果意味着大部分的耐磨料磨损工具钢都拥有大且硬的碳化物体积比。

在钢的冶炼过程中，应用上述结果时必须慎重。大部分的磨损都产生于金属对金属，而磨料磨损并非其仅有的机制。此外，如果大的碳化物从工具钢的基体里脱落出来，就会由于在磨粒中增加碳化物的磨料颗粒而使得工具钢磨损加剧。工具钢若过度回火，也会发生这种情况。

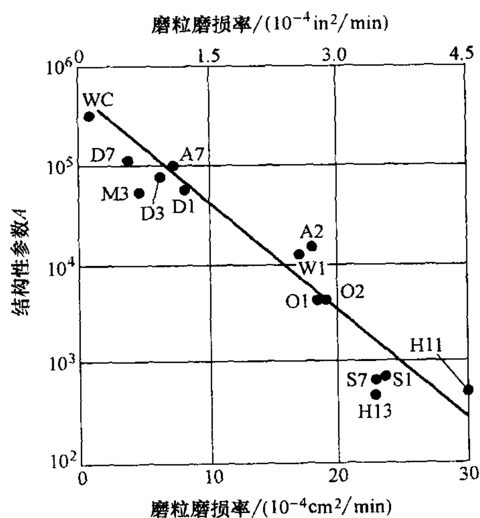


图2.6-8 工具钢的耐磨性与结构性参数A的关系。A等于碳化物的主尺寸乘以碳化物的体积比，再乘以碳化物硬度。引自参考文献[5]。

耐粘着磨损。当由于润滑剂的缺失、高压或工艺设计上的原因造成金属之间的直接接触时，在工具钢与工件之间会导致粘着磨损。这种磨损是因为工具钢与工件之间发生微凸体的冷焊而造成的，其介质也有影响。一般来说，含氧量降低(如在真空中滑动)，粘着磨损就会变得更严重，因为表面无法形成氧化膜。

降低工具钢粘着磨损的冶金学因素包括较高的工具钢的高温硬度(热硬度)、石墨工具钢的内在润滑性(型号O6和A10)、小晶粒尺寸(参考文献[6])、初始碳化物的大体积百分比(参考文献[7])以及小初始碳化物尺寸(参考文献[6])。

抗变形。就一切实际需求而言，在各种条件下使用的所有工具钢，在室温下的抗弹性变形能力(弹性模量)约为210GPa(30×10^6psi)，并且在260℃(500℉)均匀下降到约185GPa(27×10^6psi)、在540℃(1000℉)均匀

下降到约150GPa(22×10^{6}psi)。

韧性。完全硬化工具钢(某些牌号的除外)的缺口试棒在冲击试验(夏比V形缺口试验)中所吸收的能量太小，以致很难测量出有可能用来预测其使用性能的韧性之差。此外，许多工具钢的夏比V形缺口冲击吸收功只有几焦耳，而常规的夏比V形缺口冲击吸收功的误差却有±1.5J，故有人质疑这种试验方法。所以为提高测试结果的再现性，测量低韧性钢的夏比值应该用小量程的试验机。无V形缺口测量值是最常出具的工具钢抗断裂和韧性的实验室数据。然而，支撑夹具的过度变形会使得获取再现性高的数据结果变得非常困难。将扭转冲击试验用于有不同成分和经不同热处理的工具钢，可以获得有用的和有再现性的数据结果，然而把这种测试结果与其实际应用进行相关还是很困难的。疲劳试验对于研究是有用的，不过只有在某些实例里才能得到与现场经验相关的试验结果。试验得到K_{Ic}值的平面应变断裂韧度试验也越来越多地得到应用。但是在大部分的工具钢应用中，其工具要受到很高的应变率，故断裂韧度的试验结果可能意义不大(作为典型用途,如高应力落料模的工具钢的常见失效模式都是一种突发性的失效,故最好用高应变率试验包括夏比或V形缺口冲击试验进行模拟)。夏比V形缺口冲击试验和断裂韧度的试验结果比较如图2.6-9所示。

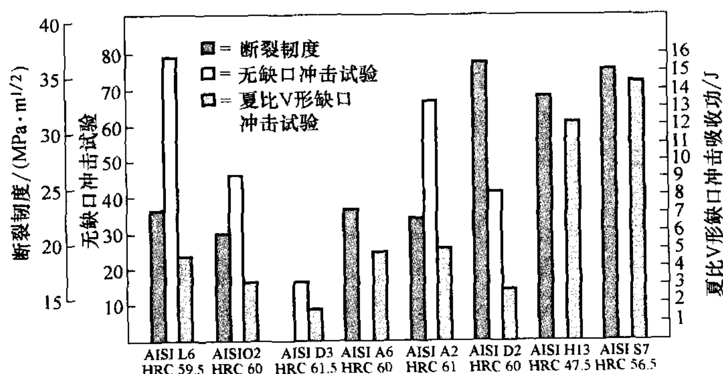


图2.6-9 断裂韧度(K_{Ic})、纵向无缺口冲击试验和纵向夏比V形缺口冲击试验结果的比较，试件为89mm(3.5in)的方形工具钢棒。引自参考文献[8]

一般来说，硬度的降低可以使工具钢在高载、高速应用中不发生断裂的承受能力得到提高。即使硬度保持不变，不同成分的或者按照不同熔炼工艺或不同热处理工艺规范生产的相同成分的工具钢都会在多方面表现出很大的差别。

表面处理对性能的影响

大部分的表面处理都是用于提高表面硬度和/或耐磨性、尽量减小粘附性(即减小摩擦)或提高工具钢基体的耐腐蚀性。

渗碳处理。表面硬化和渗碳在工具钢上都应用得十分有限，因为工具钢就有相对较高的含碳量。渗碳可以有多种方法进行，主要是将加工成的工具在含碳的固体、液体或气体里加热到奥氏体区。

低碳塑料型模钢(P型号)常要在型模的型腔压制或切削加工后进行渗碳。在这种用途里，采用含碳量较低的工具钢可以提高其型腔的压制和切削加工性，然而为了其最终使用能有足够的表面硬度就必须进行渗碳。

氮化。这是一种常用的表面处理，用于提高表面的硬度、增加工具的耐腐蚀性以及减少摩擦。其工艺主要是将加工成的工具在含氮的液体或气体里加热，使氮扩散进入工具。气体氮化通常是在比液体氮化低的温度(大约527℃或980℉)里加热较长的时间(10~90h)，而液体氮化是在538~552℃(1000~1025℉)的范围里加热2~4h。氮化深度范围要求为13~76μm(0.005~0.003in)。

由于磨损和模具粘附性的减少，冷挤压的凸模寿命可提高两至三倍。通常当锌或铝合金的压铸模涂料不好解决时，就要使用氮化。金属薄板的压模在投入使用前先进行氮化，就能减轻其划伤。

为了防止在氮化铁生成的时候容易造成剥落和破碎，进行氮化的钢应当含有一种或多种氮化物的形成元素(铬、钒或铝)。通常用于氮化的工具钢包括H11、H12、H13、A2、O2和高速工具钢。

离子或等离子氮化。它有许多与液体或气体氮化一样的特征。这种工艺靠的是通过在工具(阴极)与炉壁或屏罩(阳极)之间产生的辉光放电，并以此对氮气进行电离。其主要优点是缩短时间和降低温度，由此降低成本并减少经预硬化的工具变形和变软。处理时间通常在0.5~36h之间选用。

丰田扩散(TD)工艺(高温硼砂盐浴处理)。在这种工艺里，金属模具依次进行：去油脂处理、在一种碳化物的盐浴里浸泡规定的时间、心部淬火、回火以及最后用热水洗去所有残留的盐。硼砂盐浴含有一些带有碳化物的化合物(通常为铁合金)，而碳化物的形成元素如钒、铌和铬。根据模具钢的硬化(奥氏体化)温度设定盐浴的温度。例如对于H13模具钢，硼砂盐浴的温度应该设定为1000~1050℃(1830~1920℉)。涂层的厚度范围为2~10μm

(0.0001~0.0004in)。

w(C)为0.3%或以上的工具钢可进行TD处理。这包括大部分的冷作模具钢和热作模具钢、高速钢以及一些马氏体不锈钢。所用涂层包括碳化钒(VC)和碳化铌(NbC)，适用于要求高表面硬度(3000HV或更高)和耐磨损、咬死及腐蚀的用途；还有碳化铬(Cr_7C_3和$Cr_{23}C_6$)，适用于要求耐轻度磨损和耐高度氧化的用途。

氧化。这是一种用于高速钢切削刀具的成熟工艺。其提高刀具寿命达100%主要归功于减少摩擦的作用，这是因为它形成坚硬氧化物涂层，并作为疏松的氧化物它具有包含润滑剂并能将其涂敷于刀刃/工件界面上的能力(参考文献[9])。成品刀具的蒸汽氧化就是将其放在约566℃(1050℉)的温度里处理或置于约140℃(285℉)的氢氧化钠和硝酸钠盐里处理5~20分钟。经过这样的处理，就能在其表面形成不到5μm(0.0002in)厚的黑色氧化层，而且即使当刀具被弯曲或切断，也不会发生剥离、脱落或开裂。

渗硼。在这种工艺过程中，从围绕在经过加工的工具周围的固体、液体、气体或等离子气氛中出来的硼原子，扩散进入工具表面形成一种坚硬耐磨的硼化铁表层。金属对金属的磨损试验表明O1和O2工具钢经过渗硼处理，其耐磨性提高三倍，A2工具钢能因此增加两倍以上(参考文献[10])。在制造杯形零件的深拉工序中，经渗硼处理的A2工具钢的寿命是未经涂层的O2工具钢两倍(参考文献[10])。一种用于牛奶罐翻边的H13辊子，经过渗硼能生产多达原来三倍的牛奶罐才磨损失效(参考文献[11])。

渗硼作用发生在低至600℃(1100℉)的温度里，但通常都在800~900℃(1470~1650℉)的温度里处理1~6h(参考文献[10]、[11])。最后形成的涂层厚度为13~130μm(0.0005~0.005in)，并且由于表面的显微粗糙度而可能使其钝化。其高工艺温度要求硼处理像在奥氏体化阶段里一样起作用，或者必须继之以再奥氏体化处理。这就必然限制了这种工艺在公差大约25μm(0.001in)以内的一些用途里的应用。

电镀。最常用的工具钢电镀工艺就是镀硬铬。镀层厚度为2~13μm(0.0001~0.0005in)，而且因为非常硬，故它是通过提高耐磨料磨损性而使其寿命得以延长的。比镀层硬度更为重要的是其非常低的摩擦因数，这也能有效地防止粘着磨损。

然而，镀硬铬并非没有问题。工具钢在其电镀时会发生氢脆，而使镀层有可能剥落和脱皮。因此产生的这些磨损碎屑又加剧了磨料磨损。

无电镍敷镀(化学镀镍)代替电镀铬已成功地应用于工具钢零件的常规生产和修补敷镀的工序。用于注模和压模的涂层厚度范围为15~50μm(0.0006~0.002in)。其典型的应用包括锌压铸模、玻璃注模、塑料注射模以及塑料挤压模。

这种镀敷的方法是通过化学还原来实现的，因此它并不使用任何不同金属之间的电极偶，故也不存在任何电解过程。因此也没有发生氢脆的危险性。

化学气相沉积(CVD)。这是一种在真空容器中进行的工艺，通过气体反应在工具钢表面实现沉积。许多不同的金属可作为涂层使用。铬、Al_2O_3、TiC、CrC、Fe_4N和TiN都是一般使用的材料，还有一些材料的使用正在研究。这种工艺通常利用800℃(1472℉)以上的高温，也就是说工具钢在CVD涂层后必须进行回火。最普遍的耐磨涂层是TiC和TiN，它们用于高速钢、冷作模具钢和热作模具的工具钢的涂层。这些涂层的一般厚度范围为2.2~25μm(0.0001~0.001in)。利用TiC和TiN的CVD涂层的主要减磨机制就是，其极高的硬度及由此得到的极佳的耐磨料磨损性，尽管其摩擦因数也常能有所减小。

能成功地应用CVD涂层的工具钢包括AISI A、S、D、H、M和T型号的钢。较低合金的S型号以及所有的W和O型号是非常难以甚至无法进行很好的涂层，这是因为它们的低奥氏体化温度所致。

物理气相沉积(PVD)。这也是一种在真空容器中进行的工艺，能以几种不同的方式进行。其工艺是在200~550℃(400~1025℉)的温度下在工具钢上的TiC或TiN等离子辅助沉积(参考文献[12])。PVD的这个温度范围比CVD所要求的温度更适合于高速钢的涂层。

无论用CVD还是用PVD进行TiC或TiN涂层都能使工具钢的磨损减小到几乎相同的程度(½~⅙的磨损)。H13销子的TiN涂层可以使销-盘试验的摩擦因数从0.7减小到0.2以下(参考文献[13])。D3钢的ASTM G65-10经改进的磨料磨损试验表明，经涂层的TiN试件的磨损根据其初始表面粗糙度仅为其未经涂层的试件的4%~23%(参考文献[13])。森特魁斯特(Sundquist)等人据此提出，只有当表面粗糙度小于涂层厚度时，才能用TiC涂层提高工具钢的寿命(参考文献[13])。

离子注入。这是一种利用任何一种原子注射进入任何固体的近表区域的工艺。其工艺就是要形成一股所要求元素的带电离子束，随后以高能量对它朝固体表面的方向进行加速，这些都是在高真空的条件下进行。原子射入固体的深度为0.25~25μm(2.5~250Å)。这个过程与涂层工艺是不同的，它并不产生分离型的涂层，而

是在固体的近表面区域改变其化学成分。

离子注入就金属而言，它应用于冲压和冲孔的模具减磨方面的数量可能超过它应用于所有其他方面的。高速工具钢用于金属冲压而发生失效的主要原因就是粘着磨损。氮或钛与碳的离子注入为这类钢提供了一种最佳的处理方法。例如用于制造铝饮料罐的凸模和凹模的寿命提高到未经处理的6~10倍。同样地，用于将粉末挤压成圆片的冲头经过处理寿命可延长两倍。类似的应用范畴从压制药片到要求更高的用途(如压制陶瓷圆球)。

离子注入还被应用于不同的低温(到200℃或390℉)切削和切割刀具。切割合成纤维的刀片经过钛和碳的注射，使其耐磨性得以提高。其他应用包括切割橡胶的切割刀片、干草打包绳的割刀、塑料绑带的切割刀具、谷物脱粒刀片、切纸刀和纸张冲头。据报道，大部分这些用途的刀具，经处理后一般寿命都能提高6~10倍(参考文献[14])。其他应用包括塑料、金属粉末的注射模以及挤压模和拉丝模的离子注入。

应当指出的是相对切削刀具来说，离子注入更适合成形工具和模具。这是由于其较浅的注入层，以及不难想象许多切削刀具产生的高温会造成氮气扩散进入试件内部，以致丧失其表面效应。

微喷硬化处理。现已开发出一种独特的表面处理方法，它利用一种微型喷射介质对表面进行可控的冲击，以此在注模和压模模具表面形成具有粗糙形貌和有益的压应力的表面(参考文献[15]~[18])。粗糙形貌可提高模具润滑油的保持特性，而残余压应力能阻止在工作过程中由于循环受力或受热而产生的疲劳微裂纹。由此生成的残余抗压强度能深入到模具亚表层0.25~0.50μm(0.010~0.020in)的深度，这是氮化所达不到的，而且其硬度为44~48HRC。这种冲击过程还能使表面产生轻度的形变加工硬化，由此提高模具的有效屈服强度多达25%。

据报道，使用这种微喷硬化处理可以提高凸模和凹模的寿命6~10倍。在某些情况里，拉深模和成形模甚至可提高寿命10~20倍。这种突出的效果也可以用于切削刀具。将微喷硬化处理应用于压铸模上可增加新模的寿命，使模具上的热细裂纹得以闭合，以及消除由电火花加工(EDM)引起的不利影响。

制造特征

影响工具钢的可加工性的性能包括可加工性，可磨削性，可焊接性，可淬硬性，还有发生扭曲变形的程度、安全性(即避免裂纹的产生)以及热处理过程中发生脱碳的可能性。

切削性。工具钢的切削性可以借助结构钢通常所用的方法进行测试。其结果表示为水淬工具钢的切削性的百分比(表2.6-6)。工具钢的100%切削性相当于结构钢切削性的约30%，而后者的100%切削性就是如B1112的一种易切削结构钢。如果制造工具需要进行大量的切削或者要生产制造大量的工具，那么通过改变成分或预热处理来改善工具钢的切削性是非常重要的。

表2.6-6 退火工具钢的切削加工性的近似评价

型 号	切削性评价
O6	125
W1, W2, W5	100①
A10	90
P2, P3, P4, P5, P6	75~90
P20, P21	65~80
L2, L6	65~75
S1, S2, S5, S6, S7	60~70
H10, H11, H13, H14, H19	60~70②
O1, O2, O7	45~60
A2, A3, A4, A6, A8, A9	45~60
H21, H22, H24, H25, H26, H42	45~55②
T1	40~50
M2	45~50
T4	35~40
M3，等级1	35~40
D2, D3, D4, D5, D7, A7	30~40
T15	25~30
M15	25~30

①相当于B1112的切削性的约30%。 ②适用硬度范围为150~200HB。

磨削性。磨削性就是对于使用标准砂轮从经热处理的工具钢上磨去磨削裕量的容易程度的一种衡量。磨削比(磨削性指数)就是单位体积的砂轮磨损量所能磨去的金属体积。磨削性指数越高，金属就越容易被磨削(一般磨削性指数随碳和合金含量的增加而减小)。磨削性指数必须在一套特定的磨削条件下测试才有效。

应当指出的是，磨削性指数并不表示在磨削中或磨削后对裂纹的敏感度、产生所要求的表面(和亚表层)应力分布的能力或者获得所要求表面平滑度的容易性。

焊接性。通过对工具进行焊接制作、改制或修理而不至于产生裂纹的能力，对工具材料的选择是一个重要因素，对于大型工具更是如此。它对小工具的材

料选择就不那么重要了。焊接性很大限度上决定于成分，但是焊接方法和程序也会影响焊接的完整性。工具钢如果被深度硬化而且是属于在硬化中相对不易产生裂纹一类的，一般就更容易焊接了。一般来说，低合金牌号的工具钢都有这些特征。

淬硬性。它包括当淬火钢成为完全马氏体时所能达到的最高硬度和按特定方法淬火所能达到的硬化深度。为此，必须对硬化深度作出定义，一般以特定的硬度值或特定的显微组织形式作为其定义。作为一个非常一般的规则，工具钢的最大硬度随含碳量的增加而增加，而奥氏体晶粒的增大和合金元素数量的增加都将使形成最大硬度（增加硬化深度）所需要的冷却速度降低。广泛用于测试结构钢淬硬性的约米尼（Jominy）顶端淬火试验，若应用于工具钢会受到限制。这种试验只有对用于油淬的钢号才能得到有效的数据。空气硬化的钢号可硬化到很深，以致标准顶端淬火试验无法对其淬硬性得出有效的评价。

还有一种根据约米尼（Jominy）顶端淬火试验原理设计的空气淬硬性试验，它使用的是静止空气冷却的150mm（6in）端部直径的试块，因其大截面而形成非常缓慢的冷却速度。这种试验只能为研究提供有用的数据，它在热处理生产上的使用是很有限的。相反，水淬工具钢的钢种因硬化深度很浅而使约米尼顶端淬火试验不够敏感。规划一些特殊试验如谢菲特（Shepherd）穿透断裂（P-F）试验可应用于研究及水淬工具钢的一些特殊用途。

在谢菲特P-F试验中，一根正火状态的直径为19mm（¾in）试棒，以790℃（1450°F）的温度用盐水淬火并使其断裂。淬硬层深度（穿透度，P）测量间距为0.4mm（1/64in），淬硬层断口的晶粒大小（F）可以用标准试件进行比较。例如，P-F值6～8表示淬硬层深度为2.4mm（6/64in）且断口晶粒大小为8。细晶粒水淬工具钢就是那种断口晶粒大小（F值）为8或更高的钢种。P值为12或更高的是深度淬火钢，中度淬火钢的P值为9～11，浅度淬火钢的P值为6～8。

淬硬时的扭曲变形性和防止产生裂纹的安全性。工具钢热处理的最小扭曲变形性是很重要的，必须保持在很小的尺寸限度内。一般，其变形量和裂纹增加的可能性都随淬火的严酷性增加而增加。

抗脱碳性。对于决定在热处理过程中是否需要使用保护气氛的抗脱碳性是一个重要的因素。在一个会发生脱碳的气氛里，其脱碳的速度随奥氏体化温度的提高而迅速增加，而且在给定的奥氏体温度下，其脱碳层的深度与其保持时间直接成正比。在同样的气氛、奥氏体化温度和时间的条件下，某些型号的工具钢脱碳的速度远快于另一些工具钢。

切削裕量

所谓标准切削裕量就是向用户推荐的应该从所供应的轧制状态的坯料上切除的、以使加工后的表面上有可能对热处理结果或日后工具的正常使用功能产生不良影响的缺陷均不复存在的材料总量。

在锻造和轧制过程中，工具钢的外露表面上因为氧化而造成的脱碳，是决定坯料上所应当切除的裕量的主要因素。然而在工具钢的生产中，还应关注可能存在而必须去除的氧化皮、结疤以及其他表面缺陷。

除标准切削加工裕量以外，还必须为清除任何因最终热处理而可能产生的脱碳和变形提供充足的坯料裕量。其裕量的大小随工具钢的型号、热处理设备的种类以及工具的大小和形状的不同而变化。

W组和O组工具钢被认为是抗脱碳性高的材料。而M组钢，含钴的T组钢，D组钢和H42、A2及S5类的钢都被评为抗脱碳性差的工具钢。

发生在最终热处理过程中的脱碳是不允许的，因为它会改变表层的成分，从而使该硬化层的热处理结果发生变化，而且通常都是对热处理要求形成的性能产生负面影响，可以通过在盐浴、可控气氛或真空炉里进行热处理来控制或避免脱碳的发生。当在真空中进行热处理时，若其炉子工作条件良好并有非常低的泄漏率，则13～27Pa（100～200μmHg）的真空度就能满足大部分工具的处理要求。然而只要可能，还是推荐使用7～13Pa（50～100μmHg）的真空度。

如果没有特殊的热处理炉可供使用，那么将工具钢工件用不锈钢薄膜包裹起来也可以防止发生不必要的脱碳。型号为321不锈钢薄膜可以用于高达1010℃（1850°F）的奥氏体化温度里。型号309或310薄膜可在要求的奥氏体化温度为1010～1205℃（1850～2200°F）时使用。

P/M工具钢

粉末冶金（P/M）已经成为制造高性能工具钢和工具钢产品的一种主要工艺。目前可供的品种有经压实的或经热形变加工的坯件和棒料、半成品零件、接近无屑的成形制品以及可转位切削刀头。P/M工艺主要用于生产先进的高速工具钢。然而现在它也用于制造经改进的冷作和热作工具钢。

对于大部分的应用而言，P/M有着比传统工具钢更为独特的优点。由于所谓的铸锭偏析，传统的工具钢常包含粗大的、不均匀的显微组织，还伴之以材料的低横向性能以及在热处理中的尺寸控制和硬度不

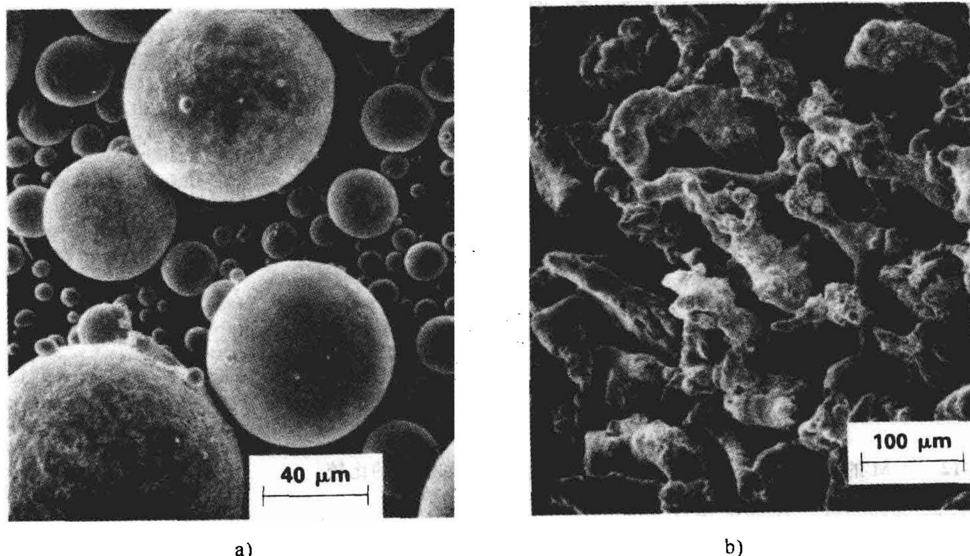
均匀的问题。用于P/M工具钢的喷雾粉末的快速凝固可以消除这种偏析，并形成非常细的显微组织以及均匀一致的碳化物和非金属夹杂物的分布。

高速工具钢的许多重要的终端应用性能都能通过粉末工艺已得到改进，突出的是切削性、磨削性和热处理的尺寸控制；还有在一些困难条件下的切削性能，这时刀具刃口的高韧性是其基本要求。进而，由于P/M工艺的合金易调整性，故易于生产各种新型高速工具钢，但它们无法用传统的铸锭工艺生产，因为存在着与偏析有关的热变形加工性问题。

P/M 工艺

全密度P/M工具钢可以用气体雾化工具钢粉末的热等静压压制法(HIP)或者工具钢粉末的冷压实再真空烧结法进行生产。两种方法得到的钢坯都有因致密和均匀的碳化物分布而不会发生偏析的特点。

粉末生产。工具钢粉末是用新的原材料和/或废钢通过感应熔化而生产的。使用的就是如前面所述的气体或水雾化法。气体雾化(以氩气或氮气)工具钢粉末是一种高表观密度(大约6g/cm³)的球状颗粒(见图2.6-10a)。氧含量低于200ppm。这种粉末用热等静压压制成为全密度的成形半成品。复杂形状也可先用冷等静压压制(CIP)，再用热等静压压制(HIP)而成。水雾化工具钢粉末具有不规则的形状颗粒(见图2.6-10b)，适用于常规的模具压实或CIP，随后经烧结，达到高密度或理论密度。



a) b)

图2.6-10 扫描电镜照片

a) 氮喷雾高速钢粉末 b) 水喷雾高速钢粉末

水雾化高速工具钢粉末可以用真空或氢气退火。于是马氏体和残留奥氏体转变成铁素体和球状碳化物的混合物。这使得粉末变得更软更有塑性，并适宜于进行压实。

工具钢的HIP。从1970年以来P/M高速工具钢粉末就一直用HIP工艺固结成全密度。按其产量，这种工艺已成为全世界绝大多数P/M高速钢生产所采用的工艺方法。

在使用HIP法过程中，先按要求配方的化学成分熔化，将熔化液料倒入喷雾罐里，在里面用高压气流将其喷射、弥散成为球状液滴并使之迅速淬火至周围环境的温度。随后将粉末从喷雾罐里取出，经过干燥、过筛后得到规定的大小粒度分布。然后将其倒入圆柱形的真空和密闭钢筒里。钢筒加热到特定的温度经热等压压实成为全密度产品。典型的工艺条件为在1100℃(2000)℉和100MPa(15ksi)下经过1h的压制固结。坯块应用常规的热轧和锻压加工成所需要的坯料和棒料尺寸。

经过HIP处理的P/M高速工具钢的一个独特特点就是其初始碳化物的细微、均匀分布。与之相同的还有经加硫处理的牌号钢中的硫化物夹杂。P/M生产和用常规生产的T15中的初始碳化物大小分布如图2.6-11所示。经气体雾化/HIP生产的P/M高速工具钢里的碳化物大部分都<3μm左右，而用常规方法生产的产品中的碳化物所覆盖的整个大小范围达34μm，其中值为6μm。P/M和常规生产的T15的显微组织比较如图2.6-12所示。

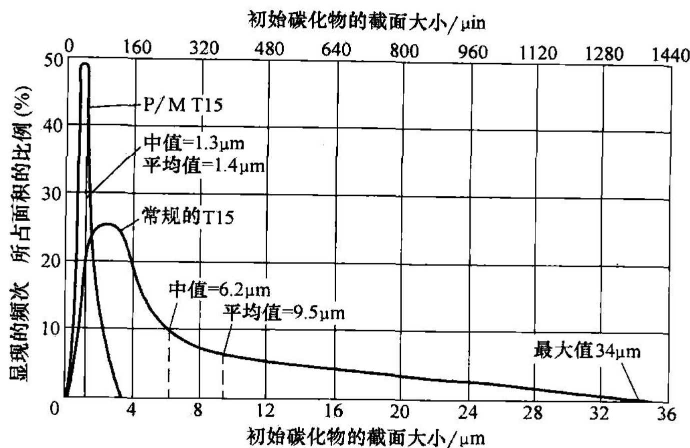


图2.6-11　用常规法和P/M工艺生产的T15高速工具钢的初始碳化物大小分布

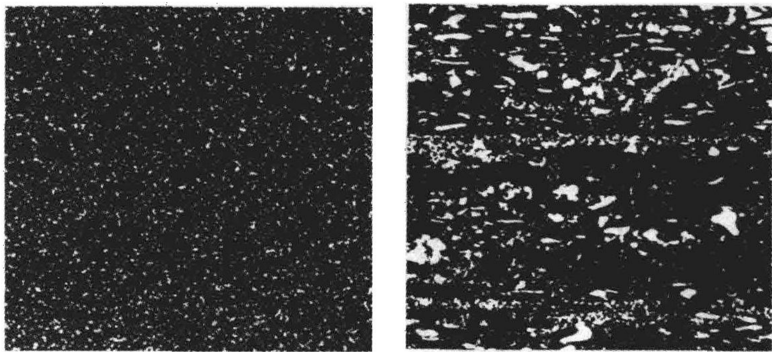


图2.6-12　P/M的(左)和可锻的(右)T15钢的碳化物大小和分布的比较

工具钢的压制和烧结。使用常规的压制和烧结技术具有制造无屑或少屑的成形制品的优点。目前，工业全密度烧结所使用的高烧结前强度和高压缩性的水雾化工具钢粉末，借助于单轴压制或柔性橡胶模在刚性的模具里进行压实，即利用CIP将其制成未经烧结的工件和零件(一般零件压制成70%~85%的理论密度)。再将这些零件放在一个由微机控制的真空炉里，以接近合金固相线的温度烧结达到实际上的全密度(至少为98%，但常为99+%的理论密度)。烧结的温度范围约为1240~1260℃(2260~2300℉)。由于在烧结过程里使用较高的温度，故在真空烧结钢中的初始碳化物比经HIP处理的工具钢中的可能会更大一些，但是还是小于相似成分的常规工具钢中的。

P/M高速工具钢

有许多不同型号的P/M高速钢(表2.6-7)可供使用。P/M工艺主要应用于标准高速工具钢(M2、M3、M4、M35等等)，它们一般都用常规方法生产的，但是当使用P/M工艺生产时，其韧性和磨削性都有显著的提高。许多因为其高碳、氮或合金含量而无法用常规方法生产的P/M高速钢现在都已开发成功。例如CPM Rex 76是一种富钴高速钢，它具有异乎寻常的热硬度和耐磨性以及在不同切削工序中大为提高的刀具寿命。由于其高合金总含量(质量分数，32.5%，比较T15的27.8%和M42的25%)，若用常规方法生产就会使这种合金无法进行锻压。

切削性。高速钢的切削性和磨削性是影响合金选用和最终成本的重要因素。一般来说，退火条件下的P/M高速工具钢的切削性都是与相似成分的常规高速工具钢的切削性相当或在很多情况下还要超过。

P/M工艺的一个重要优势就是可以通过增加含硫量来提高P/M工具钢的切削性并远远超过常规工具钢，而不必以牺牲其韧性或切削效能为代价。如表2.6-7所示的就有几种含有高达0.30%S(质量分数)的P/M高速工具钢(例如牌号M2HCHS和M3HCHS)。根据特定条件，高度加硫的P/M工具钢能比成分相似的低硫或常规高速工具钢提高切削性多达30%。

表2.6-7　用气体雾化和热等静压压制粉末生产的P/M工具钢的化学成分

商业名称[①]	AISI命名	元素成分含量(质量分数,%)								硬度　HRC
		C	Cr	W	Mo	V	Co	S	其他	
ASP 23	M3	1.28	4.20	6.40	5.00	3.10	—	—	—	65~67
ASP 30	—	1.28	4.20	6.40	5.00	3.10	8.5	—	—	66~68
ASP 60	—	2.30	4.00	6.50	7.00	6.50	10.50	—	—	67~69

（续）

商业名称①	AISI 命名	元素成分含量(质量分数,%)								硬度 HRC
		C	Cr	W	Mo	V	Co	S	其他	
CPM Rex M2HCHS	M2	1.00	4.15	6.40	5.00	2.00	—	0.27	—	64～66
CPM Rex M3HCHS	M3	1.30	4.00	6.25	5.00	3.00	—	0.27	—	65～67
CPM Rex M4	M4	1.35	4.25	5.75	4.50	4.00	—	0.06	—	64～66
CPM Rex M4HS	M4	1.35	4.25	5.75	4.50	4.00	—	0.22	—	64～66
CPM Rex M35HCHS	M35	1.00	4.15	6.00	5.00	2.00	5.0	0.27	—	65～67
CPM Rex M42	M42	1.10	3.75	1.50	9.50	1.15	8.0	—	—	66～68
CPM Rex 45	—	1.30	4.00	6.25	5.00	3.00	8.25	0.03	—	66～68
CPM Rex 45	—	1.30	4.00	6.25	5.00	3.00	8.25	0.22	—	66～68
CPM Rex 20	M62	1.30	3.75	6.25	10.50	2.00	—	—	—	66～68
CPM Rex 25	M61	1.80	4.00	12.50	6.50	5.00	—	—	—	67～69
CPM Rex T15	T15	1.55	4.00	12.25	—	5.00	5.0	0.06	—	65～67
CPM Rex T15HS	T15	1.55	4.00	12.25	—	5.00	5.0	0.22	—	65～67
CPM Rex 76	M48	1.50	3.75	10.0	5.25	3.10	9.00	0.06	—	67～69
CPM Rex 76HS	M48	1.50	3.75	10.0	5.25	3.10	9.00	0.22	—	67～69
冷变形加工工具钢										
CPM 9V	—	1.78	5.25	—	1.30	9.00	—	0.03	—	53～55
CPM 10V	—	2.45	5.25	—	1.30	9.75	—	0.07	—	60～62
CPM 15V	—	3.40	5.00	—	1.30	14.50	—	—	—	62～64
CPM 440V	—	2.15	17.50	—	0.50	5.75	—	—	—	57～59
Vanadis 4	—	1.50	8.00	—	1.50	4.00	—	—	—	59～63
Vanadis 10	—	2.90	8.00	—	1.50	9.80	—	—	1.0Si; 0.5Mn	60～62
热变形加工工具钢										
CPM H13	H13	0.40	5.00	—	1.30	1.05	—	—	—	42～48
CPM H19	H19	0.40	4.25	4.25	0.40	2.10	4.25	—	—	44～52
CPM H19V	—	0.80	4.25	4.25	0.40	4.00	4.25	—	—	44～56

①HCHS，高碳高硫；HS，高硫。

经加硫的P/M工具钢的这种切削性优势与其显微组织里的碳化物和硫化物的均匀分布有很大的关系。在常规钢里的碳化物和硫化物一般呈带状偏析，并且尺寸也比P/M钢里的大。由于P/M工具钢的硫化物尺寸小且分布均匀，故在它们的热形变加工性与力学性能受到影响之前，它们就能比常规工具钢含有更多的硫（使切削性得到相应的更大提高）。

磨削性。P/M高速钢的磨削性也超过相同成分的常规高速钢，这是因为P/M钢中尺寸小、分布均匀的碳化物，而与其棒料的尺寸无关。图2.6-13所示是几种常规高速钢和P/M高速钢的相对磨削性。P/M工具钢的磨削比明显具有优势，尤其是那些含硫量高的。如同预期，常规工具钢和P/M工具钢的磨削比一般都随它们的合金和碳含量的增加而降低。

韧性、硬度和耐磨性。高速钢的切削效能主要取决于它们的磨损、在工作温度下的抗回火性及其韧性。

耐磨性一般是硬度的函数，并随工具钢中所存在的初生碳化物的类型、体积和形状而变化。在这方

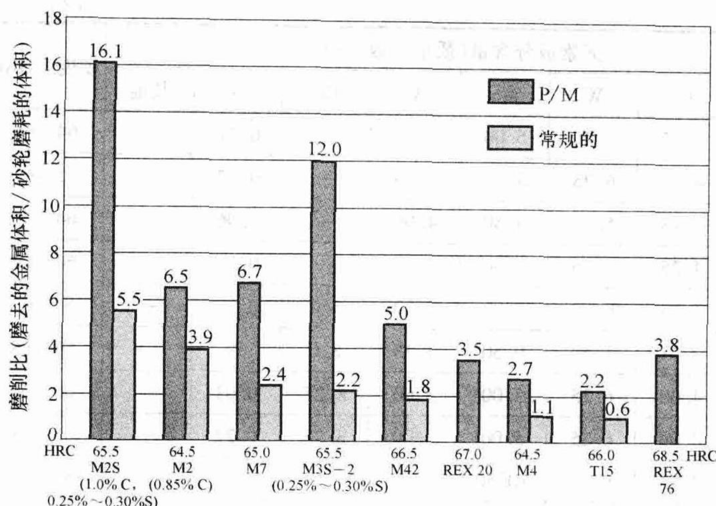


图 2.6-13　P/M 和常规高速工具钢的相对磨削性比较

面，P/M 高速工具钢所能达到的较高硬度以及这种钢中能包含较大的合金碳化物含量都构成了其超过常规高速钢的显著优点。

抗回火性或热硬性在很大程度上取决于二次硬化碳化物的成分和生长，并且由钒、钼和钴对其起促进作用。这些元素在 P/M 高速钢里比在常规钢里能更大量的使用而不会降低其性能。

高速钢的韧性取决于基体的回火状态以及初生碳化物的空间分布和大小分布。还有，碳化物在 P/M 高速钢中的均匀分布和细小尺寸代表了其重要的韧性优势。

P/M 冷作和热作工具钢

P/M 冷作工具钢。许多为高磨损和冷作用途而开发的经改进的高钒 P/M 工具钢已有了商业性供应。表2.6-7 列出了六种有代表性的 P/M 冷作工具钢牌号的化学成分。像 P/M 高速钢工具钢一样，P/M 冷作工具钢的均匀显微组织能产生更好的韧性（见图 2.6-14）。这对于冷作工具而言是非常重要的，因为使之在使用中具有较高硬度的同时，其屈服强度和耐磨性也得以改善。进而，其耐磨性也有相当大的提高，因为 P/M 冷作工具钢能比常规冷作工具钢使用更高的含钒量。

P/M 热作工具钢。P/M 工具钢不会发生偏析，故使其非常适合于在热作工具和模具上的应用，因为大型压铸模早期失效的原因多为由偏析和非多相显微组织所造成的热疲劳。表 2.6-7 列出了目前工业上应用的三种 P/M 热作工具钢的成分。其中两种为 P/M 型的标准 H13 和 H19 热作工具钢，它们具有较为均匀一致的性能，而且采用 P/M 法生产具有相当的甚至更好的韧性。第三种是标准 H19 的高钒改进型，其韧性和耐磨性得到改善。

精密铸造工具钢

接近其成品最终尺寸的工具精密铸造，由于材料损耗和切削加工的减少而具有重要的成本优越性。当模型制作的成本能分摊到大量的产品上时，尤其显示其优势。

铸造的锻造和挤压模具经验表明，铸造工具具有更高的耐热裂性；即使产生微裂纹，其增长速度也比同样牌号和硬度的锻压材料的缓慢得多。较慢的热疲劳裂纹扩展一般能显著地延长模具寿命。铸造和锻造的 H13 的力学试验表明两者的屈服强度和抗拉强度从室温到 600℃（1100℉）实际上是一样的，但是铸造材料的塑性适度地低一些。在大约 300℃（600℉）以上，铸造 H13 的热硬度要高于锻造 H13 的；这种硬度的优势随温度的升高而加大，在 650℃（1200℉）时，估计要高出大约 8HRC。

因为铸造模具在所有方向都显示均匀一致的性质，故不存在方向性（各向异性）的问题。一旦初始模制成后，其铸件的尺寸控制是非常的一致，其模型包含所有必要的修整。合理的终加工允差在型腔面上为 0.25 ~ 0.38mm（0.010 ~ 0.015in），在铸模的分型线上为 0.8 ~ 1.6mm（$\frac{1}{32}$ ~ $\frac{1}{16}$in），在背面和外表面上为 1.6 ~ 3.2mm（$\frac{1}{16}$ ~ $\frac{1}{8}$ in）。最常用的铸造热作工具钢为 H12、H13、H21 和 H25。

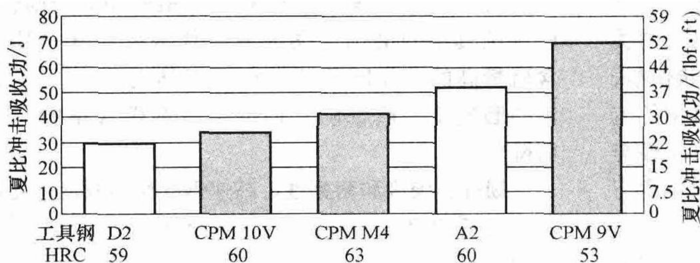


图 2.6-14　在所示的冷变形加工用途所需的硬度下，P/M 和常规工具钢的夏比冲击性能

特种工具钢

淬透不锈钢。型号 420 马氏体不锈钢（及其改进型的）为一般用于所有热塑性材料的注塑模。它特别适用于模压乙烯树脂

或其他腐蚀性塑料，或者当气氛或储存条件特别严酷的时候，因为它不需要镀铬就能耐这些类型的侵蚀。其他用于塑料模具的不锈钢包括型号414、无切削的型号420F以及Elmax钢，一种高硬度(58~60HRC)和高耐磨的P/M牌号钢。这些不锈钢的化学成分如表2.6-8所示。

表2.6-8 马氏体不锈钢塑料模具材料的化学成分

合金	化学成分(质量分数,%)							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S
414	0.15	1.0	1.0	12.5	1.9	—	—	—
420mod	0.38	0.9	0.5	13.6	—	—	0.3	—
420F mod	0.33	0.35	1.4	16.7	—	—	—	0.12
Elmax①	1.7	0.8	0.3	17.0	—	1.0	3.0	—

①用气体雾化不锈钢粉末经热等静压压制生产的P/M不锈钢。

无论锻压型或P/M型的型号440马氏体不锈钢都可应用于一些冷变形加工用途。CPM440V是一种高钒、高铬的工具钢，应用于要求高耐磨和优良耐腐性的用途。其材料成分(表2.6-7)主要是在锻造类的440C中加入约5.75% V(质量分数)和增加含碳量，以此提高其耐磨性。

马氏体时效钢。某些高镍马氏体时效钢可用于一些特殊的无切削工具的用途，18Ni(250)就是其中最常用的。然而作为要求最高的用途，通常还是首推强度较高的18Ni(300)。作为要求具有最高耐磨料磨损的可以用任何一种经过氮化处理的马氏体时效钢。

马氏体时效钢通过简单的时效处理，通常在约480℃(900 ℉)处理3h，便可获得完全硬度，名义上18Ni(250)的500HRC(原文如此,似为50HRC之误——译者注)，18Ni(300)的54HRC和18Ni(350)的58HRC。由于其硬化并不取决于冷却速度，故可以在整个截面上获得均匀一致的完全硬度，而且几乎不发生扭曲变形。这些合金也不用考虑脱碳，因为它们并不含有作为合金元素的碳。如果长时间的工作温度都超过其时效温度，过度时效的马氏体时效钢的硬度就会明显下降。

牌号18Ni(250)钢用于铝的压铸模和模芯、铝的热锻模、注塑模和用于铝挤压的各种支承工装。马氏体时效钢能以比H13工具钢有可能达到的更高硬度应用于铝压铸，因为马氏体时效钢不容易出现热裂。因为时效过程所造成的尺寸变化非常小，故有可能在最终硬化之前就将注塑模的复杂型腔切削加工到最终尺寸。

为了注塑极其耐磨料磨损型的塑料，要求18Ni(300)马氏体时效钢具有更高的表面硬度。

参考文献

[1] *Steel Products Manual: Tool Steels,* Iron and Steel Society, April 1988.
[2] "Tool Steel Guide," Teledyne Vasco, Monroe, SC, 1985.
[3] R. Wilson, *Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels,* McGraw-Hill, 1975.
[4] H. Brandis, E. Haberling, and H.H. Wiegard, Metallurgical Aspects of Carbides in High Speed Steels, *Processing and Properties of High Speed Tool Steels,* M.G.H. Wells and L.W. Lherbier, Ed., TMS-AIME, 1980, p 1–18.
[5] K.G. Budinski, Wear of Tool Steels, *Wear of Materials,* American Society of Mechanical Engineers, 1977, p 100–109.
[6] P.L. Hurricks, Some Metallurgical Factors Controlling the Adhesive and Abrasive Wear Resistance of Steels, *Wear,* Vol 26, 1973, p 285–304.
[7] S. Söderberg and S. Hogmark, Wear Mechanisms and Tool Life of High Speed Steels Related to Microstructure, *Wear,* Vol 110, 1986, p 315–329.
[8] R.M. Hemphill and D.E. Wert, Impact and Fracture Toughness Testing of Common Grades of Tool Steels, *Tool Materials for Molds and Dies,* G. Krauss and H. Nordberg, Ed., Colorado School of Mines Press, 1987, p 66–91.
[9] T.D. Deming, Steam Treating Emerges as Important Cog in Metal Surface Engineering, *Independent. Heat.,* Jan 1990, p 28–30.
[10] H.C. Fiedler and R.J. Sieraski, Boriding Steels for Wear Resistance, *Met. Prog.,* Feb 1971, p 102–103.
[11] O.N. Guy, Boronizing—A Surface Heat Treatment for Critical Wear Surfaces, *New Developments in Tool Materials and Applications,* Illinois Institute of Technology, 1977.
[12] F. Wendl, Current Trends in Surface Treatment of Tools Used for Plastics Processing, *Thyssen Edelstahl Tech. Ber.,* special issue, May 1990, p 82–99.
[13] H.A. Sundquist, E.H. Sirvio, and M.T. Kurkinen, Wear of Metalworking Tools Ion Plated with Titanium Nitride, *Met. Technol.,* Vol 10, 1983, p 130–134.
[14] R.E. Hoisington, Extending Tool Life with Ion Implantation, *G.E. Technol.,* Jan 1986, p 9–12.
[15] "MetalLife: Extended Life and Improved Performance from Dies," Badger Metal Tech., Menomonee Falls, WI.

[16] "MetalLife: Extended Life and Improved Performance from Die Casting,' Badger Metal Tech., Menomonee Falls, WI.
[17] J.V. Skoff, MetalLife for Lubricant Retention; A Key to Better Tool Performance, *Met. Stamp.*, Sept 1986, p 8–12.
[18] Micro-Precision Peening Process Boosts Die Life, *Precis. Met.*, Dec 1986, p 9.

精选参考文献

- J.R. Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Tool Materials*, ASM International, 1995.
- G. Hoyle, *High Speed Steels*, Butterworths, 1988.
- V.A. Kortesoja, *Properties and Selection of Tool Materials*, American Society for Metals, 1975.
- G. Krauss, Ed., *Tool Steels*, 5th ed., ASM International, 1997.
- P. Payson, *The Metallurgy of Tool Steels*, John Wiley & Sons, 1962.
- M.G.H. Wells and L.W. Lherbier, Ed., *Processing and Properties of High Speed Tool Steels*, TMS-AIME, 1980.
- R. Wilson, *Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels*, McGraw-Hill, 1975.

第7章 不 锈 钢

本章许多内容由《ASM 特种手册》，不锈钢，1994 的内容精简而成。补充内容则引自《ASM 特种手册》，耐热材料，1997，123 ~ 178 页。其他有关内容还可查阅本章末所列的精选参考文献。

第1节 锻压不锈钢：选择和应用

不锈钢是至少含有大约 11% Cr(质量分数)的铁基合金，其含量就是为防止在未经污染的大气中生成铁锈所需要的(故命名为不锈)。不锈钢几乎没有含量高于 30% Cr 或低于 50% Fe(质量分数)的。它们通过形成一种看不见的富铬氧化物的表面膜粘附于表面，由此得到其不锈的性能。这种氧化膜能在有氧气存在的条件下生成并能自我修复。为改善一些特定特性还要加入一些其他元素，包括镍、钼、铜、钛、铝、硅、铌、氮、硫和硒。w(C)从低于 0.03% 到某些马氏体牌号里的 1.0% 以上。图 2.7-1 有效地概括了不锈钢家族中成分和性质的联系。

不锈钢的生产分为两个阶段：废料和铁合金在电

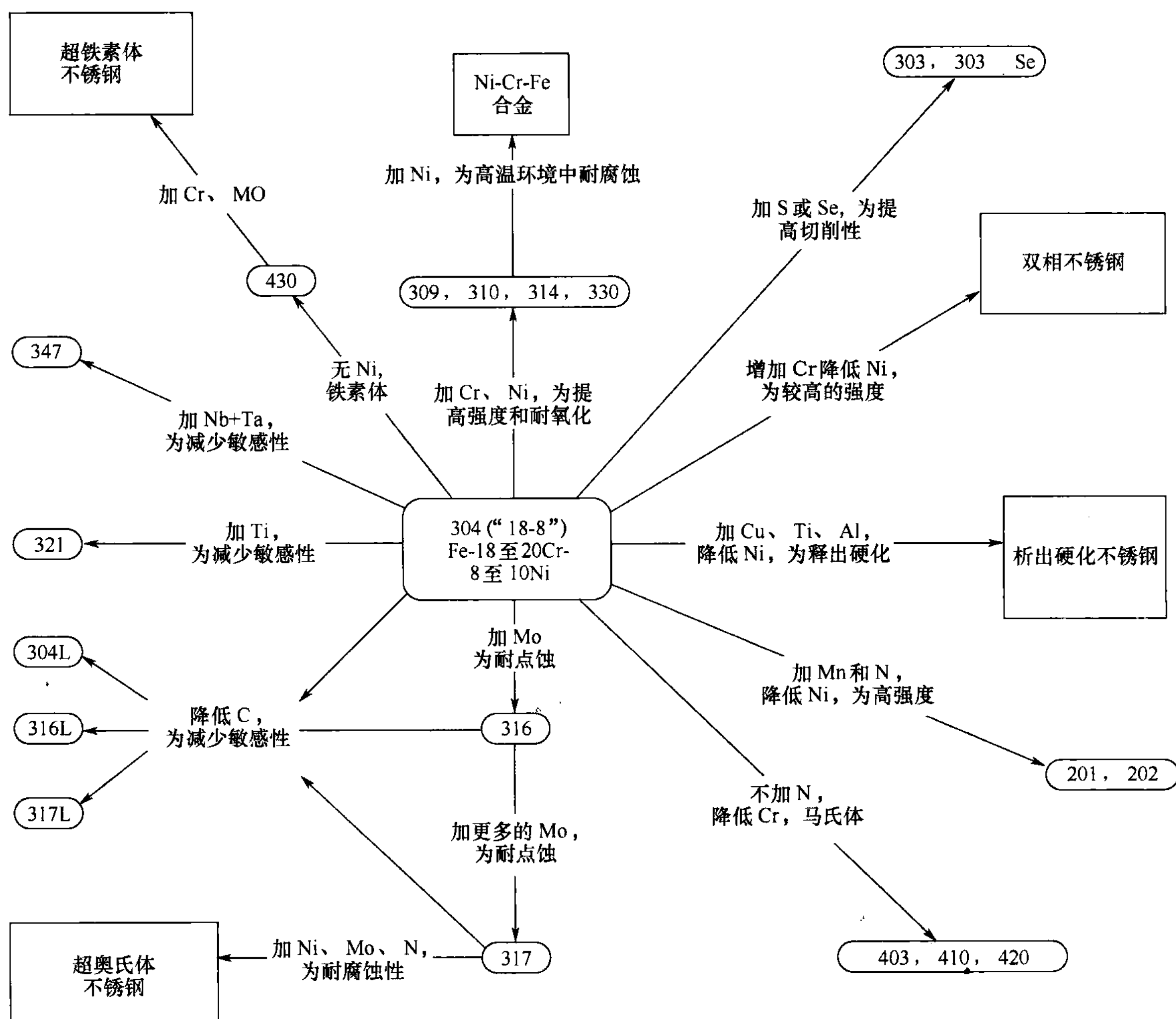


图 2.7-1 不锈钢家族中成分和性质的联系

弧炉里的熔化；再通过氧-惰性气体喷射(氩氧脱碳)或在真空下氧喷射(真空氧脱碳)进行精炼，以此调整含碳量和去除杂质(这两种工艺都在本手册第2篇第2章有关内容中叙述)。经过精炼的熔化金属被倒入锭模成为铸锭，然后再将其轧制成初轧坯或扁坯；或者将熔化金属直接倒入连续浇铸机成形为扁坯、钢坯或方坯。铸锭可以进行辊轧或锻压，连续浇铸的扁坯可以用于生产扁平产品(薄钢板、厚钢板和带钢)。而经过轧制的产品可以拉、弯、挤或拔丝。不锈钢还可以进一步切削加工成形，它们还能进行焊接、硬钎焊、软钎焊和粘接。不锈钢还可以作为普通碳素钢或低合金钢以及某些非铁金属和合金的整体包层使用。

不锈钢的应用非常广泛。大部分的结构用途在化学工业和电力工业上，它们占据全部不锈钢产品市场的三分之一以上(见下表)。这些用途涉及极为繁杂的应用领域，包括核反应堆的容器、换热器、石油管件、化工流程和纸浆及造纸工业中用的零部件、加热炉的零件以及火力发电厂里用的锅炉。不锈钢主要应用领域的相对重要性如下表所列。

应　　用	所占比例(%)
工业设备	
化学和电力工程	34
食品和饮料工业	18
运输	9
建筑业	5
消费品	
家用电器、家庭用器皿	28
小型电器、电子器具	6

其中一些用途包括在高温或低温中的使用，奥氏体不锈钢(见如下所述)将能很好地适用于这两种应用。

用于不锈钢的代号

在美国，锻压不锈钢牌号一般根据美国钢铁学会(AISI)的代号系统、统一代号系统(UNS)或适当的合金钢名称进行命名。此外，大多数主要工业国家也都建立命名系统。在美国的这两种规定编号系统里，AISI是一种较老的、使用也较为广泛的系统。大部分的牌号都用三位数字的代号，200和300系列一般为奥氏体不锈钢，而400系列为铁素体或马氏体不锈钢。有些牌号带一或两个字母的后缀，用于表示特定的成分改进型。

用UNS系统所表示的不锈钢大多于用AISI系统，因为它囊括所有较新开发的不锈钢。不锈钢的UNS命名是以字母S及其后面跟随的五位数字表示的。对于那些有AISI命名的合金，其前面的三位数就对应于AISI的数字。当最后两位数字为00时，编号代表基本AISI牌号。基本牌号的改进型则用两位非零的数字代表。对含有高镍含量(近25%~35%)的不锈钢而言，UNS命名以字母N及后面跟随的五位数字代表，如为N08020(20Cb-3)、N08024(20Mo-4)、N08026(20Mo-6)、N08366(AL-6X)和N08367(AL-6XN)。虽然这些是按UNS系统分类的镍基合金，但前面提及的材料构成了如图2.7-1所示的“超奥氏体”类的不锈钢，下一节“不锈钢的分类”中将予以详述。

不锈钢的分类

不锈钢可以分成五大类。四类是基于各类合金中带有特征性的晶体学组织和显微组织：马氏体、铁素体、奥氏体或双相(奥氏体加铁素体)。第五类，析出硬化合金则是基于其所用的热处理而不是显微组织。

马氏体不锈钢

特征与成分。马氏体不锈钢基本上是Fe-Cr-C合金，它具有在硬化条件下的体心正方(bct)晶体结构(马氏体的)。它们是铁磁性的，通过热处理硬化，一般只能在相对缓和的介质中具有耐腐蚀性。$w(Cr)$一般为10.5%~18%，而$w(C)$可以超过1.2%。通过铬和碳的含量平衡保证其马氏体的组织。可以再加入铌、钨和钒元素用于改善硬化后的回火效果。加入少量的镍可以提高其在某些介质中的耐腐蚀性，并使韧性提高。在某些牌号里，加入硫和硒是为了提高其切削性。表2.7-1列出了一些标准(AISI)和非标准牌号的化学成分。

表2.7-1 马氏体不锈钢的化学成分

UNS编号	型号/代号	成分[①](质量分数,%)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	其　他
标准(AISI)牌号									
S40300	403	0.15	1.00	0.50	11.5~13.0	—	0.04	0.03	—
S41000	410	0.15	1.00	1.00	11.5~13.5	—	0.04	0.03	—

（续）

UNS 编号	型号/代号	成分①（质量分数,%）							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	其 他
标准(AISI)牌号									
S41400	414	0.15	1.00	1.00	11.5~13.5	1.25~2.50	0.04	0.03	—
S41600	416	0.15	1.25	1.00	12.0~14.0	—	0.06	≥0.15	0.6Mo②
S41623	416Se	0.15	1.25	1.00	12.0~14.0	—	0.06	0.06	≥0.15Se
S42000	420	≥0.15	1.00	1.00	12.0~14.0	—	0.04	0.03	—
S42020	420F	≥0.15	1.25	1.00	12.0~14.0	—	0.06	≥0.15	0.6Mo②
S42200	422	0.20~0.25	1.00	0.75	11.5~13.5	0.5~1.0	0.04	0.03	0.75~1.25Mo; 0.75~1.25W; 0.15~0.3V
S43100	431	0.20	1.00	1.00	15.0~17.0	1.25~2.50	0.04	0.03	—
S44002	40A	0.60~0.75	1.00	1.00	16.0~18.0	—	0.04	0.03	0.75Mo
S44003	440B	0.75~0.95	1.00	1.00	16.0~18.0	—	0.04	0.03	0.75Mo
S44004	440C	0.95~1.20	1.00	1.00	16.0~18.0	—	0.04	0.03	0.75Mo
非标准牌号									
S41008	种类410S	0.08	1.00	1.00	11.5~13.5	0.60	0.040	0.030	—
S41040	种类410Cb （XM-30）	0.15	1.00	1.00	11.5~13.5	—	0.040	0.030	0.05~0.20Nb
DIN1.4935③	HT9	0.17~0.23	0.30~0.80	0.10~0.50	11.0~12.5	0.30~0.80	0.035	0.035	0.80~1.20Mo; 0.25~0.35V; 0.4~0.6W
S41610	416加X （XM-6）	0.15	1.5~2.5	1.00	12.0~14.0	—	0.060	≥0.15	0.6Mo
S41800	种类418（希腊镍铬铁防锈合金）	0.15~0.20	0.50	0.50	12.0~14.0	1.8~2.2	0.040	0.030	2.5~3.5W
S42010	TrimRite	0.15~0.30	1.00	1.00	13.5~15.0	0.25~1.00	0.040	0.030	0.40~1.00Mo
S42023	种类429FSe	0.3~0.40	1.25	1.00	12.0~14.0	—	0.060	0.060	≥0.15Se; 0.6Zr; 0.6Cu
S42300	Lapelloy	0.27~0.32	0.95~1.35	0.50	11.0~12.0	0.50	0.025	0.025	2.5~3.0Mo; 0.2~0.3V
S44020	种类440F	0.95~1.20	1.25	1.00	16.0~18.0	0.75	0.040	0.10~0.35	0.08N
S44023	种类440FSe	0.95~1.20	1.25	1.00	16.0~18.0	0.75	0.040	0.030	≥0.15Se; 0.60Mo

①单一数值的为最大值，除非另有注明。 ②可选的。 ③德国（DIN）技术规范。

特性和应用。马氏体不锈钢家族中使用最普遍的是型号410，为获得强度它含有（质量分数）约12%Cr和0.1%C。420、420A、440B和440C的合金系列的含碳量及其强度都有提高。尤其后三种合金，为保持其耐腐性还增加了铬的含量。如在型号422不锈钢中加入钼，则可以提高其力学性能和耐腐蚀性。镍可以同样的理由加入到型号414和431里，当用较高的含铬量来提高耐腐蚀性时，镍还能起到保持所需要的显微组织并防止产生过量游离铁素体的作用。为保持所需要的全马氏体组织需限制其合金含量，于是所能有的耐腐蚀性只能限制在中等的水平上。

在退火条件下，马氏体不锈钢的拉伸屈服强度约

为275MPa(40ksi)，并通过冷变形加工进行中等程度的硬化。然而马氏体合金通过一般的硬化、回火的热处理使屈服强度达到1900MPa(275ksi)，这主要取决于它们的含碳量。这些合金具有很好的塑性和韧性，并随其强度的增加而减小。根据所用的热处理，马氏体的硬度值范围从退火状态材料的约150HB(80HRB)到全硬化材料的600HB(58HRC)以上。

当用途需要有很好的抗拉强度、蠕变和疲劳强度并结合有中等程度的耐腐蚀性及高达约650℃(1200℉)的耐热性时，要对所用马氏体不锈钢做出规定。在美国，低碳和中碳马氏体钢(如型号410及其改进型)主要应用于蒸汽轮机、喷气发动机和燃气轮机。在欧洲，合金HT9(12Cr-1Mo-0.3V)广泛应用于高温、压力容器的用途，包括燃煤火力发电厂里用的蒸汽管线、蒸汽发电机再加热炉和过热器管。型号420及其类似的合金则应用于刀具、阀件、齿轮、轴和滚子。较高碳的牌号(型号440)的其他用途包括刀具、外科和牙科用的器具、剪刀、弹簧、阀、齿轮、轴、凸轮和球轴承。

铁素体不锈钢

特性和成分。铁素体不锈钢主要是具有体心立方(bcc)晶体组织的铁铬合金。$w(Cr)$通常为11%~30%。一些牌号可以含钼、硅、铝、钛和铌，使之具有特定的性能。硫或硒的加入可提高其切削性。表2.7-2列出了铁素体不锈钢的成分。

表2.7-2　铁素体不锈钢的化学成分

UNS编号	型号/代号	化学成分[①](质量分数,%)					
		C	Cr	Mo	Ni	N	其　他
第一代合金							
S42900	429	0.12	14.0~16.0	—	—	—	—
S43000	430	0.12	16.0~18.0	—	—	—	—
S43020	430F	0.12	16.0~18.0	0.6	—	—	0.06P；≥0.15S
S43023	430FSe	0.12	16.0~18.0	—	—	—	≥0.15Se
S43400	434	0.12	16.0~18.0	0.75~1.25	—	—	—
S43600	436	0.12	16.0~18.0	0.75~1.25	—	—	Nb+Ta≥5×%C
S44200	442	0.20	18.0~23.0	—	—	—	—
S44600	446	0.20	23.0~27.0	—	—	—	—
第二代合金							
S40500	405	0.08	11.5~14.5	—	—	—	0.10~0.30Al
S40900	409	0.08	10.5~11.75	—	0.5	—	6×C≤Ti≤0.75
—	409Cb	0.02[②]	12.5[②]	—	0.2[②]	—	0.4Nb[②]
S44100	441	0.02[②]	18.0[②]	—	0.3[②]	—	0.7Nb[②]，0.3Ti[②]
—	AL433	0.02[②]	19.0[②]	—	0.3[②]	—	0.4Nb[②]，0.5Si[②]，0.4Cu[②]
—	AL446	0.01[②]	11.5[②]	—	0.2[②]	—	0.2Nb[②]，0.1Ti[②]
—	AL468	0.01[②]	18.2[②]	—	0.2[②]	—	0.2Nb[②]，0.1Ti[②]
—	YUS436S	0.01[②]	17.4[②]	1.2[②]	—	—	0.2Ti[②]
S43035	439	0.07	17.0~19.0	—	0.5	—	0.20+4(C+N)≤Ti≤1.0
—	12SR	0.2	12.0	—	—	—	1.2Al；0.3Ti
—	18SR	0.04	18.0	—	—	—	2.0Al；0.4Ti
K41970	406	0.06	12.0~14.0	—	0.5	—	2.75~4.25Al；0.6Ti

（续）

UNS编号	型号/代号	化学成分[①]（质量分数，%）						
		C	Cr	Fe	Mo	Ni	N	其　他
第三代合金								
S44626	26-1Ti	0.02	26	余量	1	0.25	0.025	0.5Ti
S44400	型号444	0.02	18	余量	2	0.4	0.02	0.5Ti
S44660	SEA-CURE	0.02	27.5	余量	3.4	1.7	0.025	0.5Ti
S44635	Nu Monit	0.025	25	余量	4	4	0.025	0.4Ti
S44735	AL29-4C	0.030	29	余量	4	1.0	0.045	(Nb + Ti)
S44726	E-Brite26-1	0.002	26	余量	1	0.1	0.01	0.1Nb
S44800	AL29-4-2	0.005	29	余量	4	2	0.01	—
—	SHOMAC26-4	0.003	26	余量	4	—	0.005	—
—	SHOMAC30-2	0.003	30	余量	2	0.18	0.007	—
—	YUS190L	0.004	19	余量	2	—	0.0085	0.15Nb

①单一数值的为最大值，除非另有注明。　②典型值。

铁素体合金是铁磁性的。它们能有良好的塑性和成形性，但与奥氏体牌号的相比，其高温强度相对较差。在低温和大截面的情况下，其韧性也受到一些限制。与马氏体不锈钢不一样，铁素体不锈钢不能通过热处理进行强化。还有，由于铁素体的应变硬化率相对较低和冷变形加工会显著降低其塑性，所以铁素体不锈钢不常用冷变形加工进行强化。

性能和应用。铁素体不锈钢退火后屈服和抗拉强度一般分别为35～55ksi(240～380MPa)和60～85ksi(415～585MPa)。塑性可达到的范围为20%～35%。如表2.7-1所示的经高合金化的“超铁素体”钢的屈服强度可以达到高达75ksi(515MPa)，抗拉强度可到95ksi(655MPa)。

因此，马氏体不锈钢仅仅能提供中等的耐腐蚀性，而铁素体不锈钢从低至中含铬量的合金所具有的中等耐腐蚀性一直到超级铁素体如型号444和UNS编号的S44627、S44635、S44660、S44700和S44800所具有的极佳耐腐蚀性。低铬(w(Cr)为11%)合金如型号405和409的成本虽低，却仍有不错的耐腐蚀、耐氧化性和优良的加工性。应用最为广泛的型号409铁素体不锈钢被大量用于汽车排气系统里。中等含铬量(w(Cr)16%～18%)的合金包括型号430，能耐轻度氧化酸和有机酸，适用于食品处理设备；以及型号434含有钼，用于提高耐腐蚀性，适用于汽车内饰。高铬(w(Cr)为19%～30%)合金包括型号442和446以及超级铁素体，应用于需要耐高腐蚀性和耐氧化性的用途。通过在氩氧脱碳工艺中控制间隙元素含量有可能生产出特别高铬和钼含量(高至4.5%(质量分数))且非常低含碳量(w(C)低至0.01%)的牌号。如此高合金的超级铁素体能形成特别高的耐因接触氯化盐水溶液而造成的局部性腐蚀的能力。局部性腐蚀如点蚀、裂隙腐蚀和应力腐蚀开裂(SCC)都是困扰许多奥氏体不锈钢的问题。因此超级铁素体常应用于水基氯化盐溶液或海水里的换热器和管线系统。

奥氏体不锈钢

特性和成分。奥氏体不锈钢从合金的数量和使用上均构成最大的不锈钢家族。像铁素体合金一样，它们无法用热处理进行硬化。然而它们之间的相似性也就到此为止。退火状态的奥氏体不锈钢基本上是非磁性的，而且只能通过冷变形加工进行硬化。通常它们具有优异的低温性能和良好的高温强度及耐氧化性。w(Cr)一般为16%～26%，w(Ni)低于或等于约35%，w(Mn)低于或等于15%。200系列钢含有氮、4%～15%Mn(质量分数)和较低的镍含量(w(Ni)不超过7%)。300系列钢含有更多含量的镍和不超过2%(质量分数)的锰。钼、铜、硅、铝、钛和铌都可以加入一些，以赋予一定的特性，如耐氯化盐点蚀或氧化的能力。表2.7-3所示是其标准(AISI)和非标准牌号的化学成分。

表 2.7-3 奥氏体不锈钢的化学成分

UNS 编号	型号/代号	化学成分[1]（质量分数,%）							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	其　他
标准(AISI)牌号									
S20100	201	0.15	5.5~7.5	1.00	16.0~18.0	3.5~5.5	0.06	0.03	0.25N
S20200	202	0.15	7.5~10.0	1.00	17.0~19.0	4.0~6.0	0.06	0.03	0.25N
S20500	205	0.12~0.25	14.0~15.5	1.00	16.5~18.0	1.0~1.75	0.06	0.03	0.32~0.40N
S30100	301	0.15	2.0	1.00	16.0~18.0	6.0~8.0	0.045	0.03	—
S30200	302	0.15	2.0	1.00	17.0~19.0	8.0~10.0	0.045	0.03	—
S30215	302B	0.15	2.0	2.0~3.0	17.0~19.0	8.0~10.0	0.045	0.03	—
S30300	303	0.15	2.0	1.00	17.0~19.0	8.0~10.0	0.20	≥0.15	0.6Mo[2]
S30323	303Se	0.15	2.0	1.00	17.0~19.0	8.0~10.0	0.20	0.06	≥0.15Se
S30400	304	0.08	2.0	1.00	18.0~20.0	8.0~10.5	0.045	0.03	—
S30409	304H	0.04~0.10	2.0	1.00	18.0~20.0	8.0~10.5	0.045	0.03	—
S30403	304L	0.03	2.0	1.00	18.0~20.0	8.0~12.0	0.045	0.03	—
S30453	304LN	0.03	2.0	1.00	18.0~20.0	8.0~12.0	0.045	0.03	0.10~0.16N
S30430	302Cu	0.08	2.0	1.00	17.0~19.0	8.0~10.0	0.045	0.03	3.0~4.0Cu
S30451	304N	0.08	2.0	1.00	18.0~20.0	8.0~10.5	0.045	0.03	0.10~0.16N
S30500	305	0.12	2.0	1.00	17.0~19.0	10.5~13.0	0.045	0.03	—
S30800	308	0.08	2.0	1.00	19.0~21.0	10.0~12.0	0.045	0.03	—
S30900	309	0.20	2.0	1.00	22.0~24.0	12.0~15.0	0.045	0.03	—
S30908	309S	0.08	2.0	1.00	22.0~24.0	12.0~15.0	0.045	0.03	—
S31000	310	0.25	2.0	1.50	24.0~26.0	19.0~22.0	0.045	0.03	—
S31008	310S	0.08	2.0	1.50	24.0~26.0	19.0~22.0	0.045	0.03	—
S31400	314	0.25	2.0	1.5~3.0	23.0~26.0	19.0~22.0	0.045	0.03	—
S31600	316	0.08	2.0	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.03	2.0~3.0Mo
S31620	316F	0.08	2.0	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.20	≥0.10	1.75~2.5Mo

(续)

UNS 编号	型号/代号	化学成分①(质量分数,%)							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	其 他
标准(AISI)牌号									
S31609	316H	0.04~0.10	2.0	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.03	2.0~3.0Mo
S31603	316L	0.03	2.0	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.03	2.0~3.0Mo
S31653	316LN	0.03	2.0	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.03	2.0~3.0Mo; 0.10~0.16N
S31651	316N	0.08	2.0	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.03	2.0~3.0Mo; 0.10~0.16N
S31700	317	0.08	2.0	1.00	18.0~20.0	11.0~15.0	0.045	0.03	3.0~4.0Mo
S31703	317L	0.03	2.0	1.00	18.0~20.0	11.0~15.0	0.045	0.03	3.0~4.0Mo
S32100	321	0.08	2.0	1.00	17.0~19.0	9.0~12.0	0.045	0.03	Ti≥5×%C
S32109	321H	0.04~0.10	2.0	1.00	17.0~19.0	9.0~12.0	0.045	0.03	Ti≥5×%C
N08330	330	0.08	2.0	0.75~1.5	17.0~20.0	34.0~37.0	0.04	0.03	—
S34700	347	0.08	2.0	1.00	17.0~19.0	9.0~13.0	0.045	0.03	Nb≥10×%C
S34709	347H	0.04~0.10	2.0	1.00	17.0~19.0	9.0~13.0	0.045	0.03	8×%C≤Nb≤1.0
S34800	348	0.08	2.0	1.00	17.0~19.0	9.0~13.0	0.045	0.03	0.2Co; Nb≥10×%C; 0.10Ta
S34809	348H	0.04~0.10	2.0	1.00	17.0~19.0	9.0~13.0	0.045	0.03	0.2Co; 10×%C≤Nb≤1.0; 0.10Ta
S38400	384	0.08	2.0	1.00	15.0~17.0	17.0~19.0	0.045	0.03	—
非标准牌号									
S20161	Gall-Tough	0.15	4.00~6.00	3.00~4.00	15.0~18.0	4.00~6.00	0.040	0.040	0.08~0.20N
S20300	203 EZ(XM-1)	0.08	5.0~6.5	1.00	16.0~18.0	5.0~6.5	0.040	0.18~0.35	0.5Mo; 1.75~2.25Cu
S20910	Nitronic 50(XM-19)	0.06	4.0~6.0	1.00	20.5~23.5	11.5~13.5	0.040	0.030	1.5~3.0Mo; 0.2~0.4N; 0.1~0.3Nb; 0.1~0.3V
S21400	Tenelon (XM-31)	0.12	14.5~16.0	0.3~1.0	17.0~18.5	0.75	0.045	0.030	0.35N
S21460	Cryogenic Tenelon (XM-14)	0.12	14.0~16.0	1.00	17.0~19.0	5.0~6.0	0.060	0.030	0.35~0.50N
S21500	Esshete 1250	0.15	5.5~7.0	1.20	14.0~16.0	9.0~11.0	0.040	0.030	0.003~0.009B; 0.75~1.25Nb; 0.15~0.40V
S21600	型号 216 (XM-17)	0.08	7.5~9.0	1.00	17.5~22.0	5.0~7.0	0.045	0.030	2.0~3.0Mo; 0.25~0.50N

（续）

UNS 编号	型号/代号	化学成分[1]（质量分数,%）							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	其他
非标准牌号									
S21603	型号 216L(XM-18)	0.03	7.5~9.0	1.00	17.5~22.0	7.5~9.0	0.045	0.030	2.0~3.0Mo; 0.25~0.50N
S21800	Nitronic 60	0.10	7.0~9.0	3.5~4.5	16.0~18.0	8.0~9.0	0.040	0.030	0.08~0.18N
S21900	Nitronic 40(XM-10)	0.08	8.0~10.0	1.00	19.0~21.5	5.5~7.5	0.060	0.030	0.15~0.40N
S21904	21-6-9LC	0.04	8.00~10.00	1.00	19.00~21.50	5.50~7.50	0.060	0.030	0.15~0.40N
S24000	Nitronic 33(18-3Mn)	0.08	11.50~14.50	1.00	17.0~19.00	2.50~3.75	0.060	0.030	0.20~0.40N
S24100	Nitronic 32(18-2Mn)	0.15	11.00~14.00	1.00	16.50~19.50	0.50~2.50	0.060	0.030	0.20~0.40N
S28200	18~18Plus	0.15	17.0~19.0	1.00	17.5~19.5	—	0.045	0.030	0.5~1.5Mo; 0.5~1.5Cu; 0.4~0.6N
S30310	303 Plus X(XM-5)	0.15	2.5~4.5	1.00	17.0~19.0	7.0~10.0	0.020	≥0.25	0.6Mo
S30415	MVMA[3]	0.05	0.60	1.30	18.5	9.50	—	—	0.15 N; 0.04Ce
S30424	304BI[4]	0.08	2.00	0.75	18.0~20.00	12.00~15.00	0.045	0.030	0.10N; 1.00~1.25B
S30452	304HN(XM-21)	0.04~0.10	2.00	1.00	18.0~20.0	8.0~10.5	0.045	0.030	0.16~0.30N
S30600	Cronifer 1815LCSi	0.018	2.00	3.73~4.3	17.0~18.5	14.0~15.5	0.020	0.020	0.2Mo
S30615	RA85 H(c)	0.20	0.80	3.50	18.5	14.50	—	—	1.0Al
S30815	253 MA	0.05~0.10	0.80	1.4~2.0	20.0~22.0	10.0~12.0	0.040	0.030	0.14~0.20N; 0.03~0.08Ce; 1.0Al
S30940	型号 309 SCb	0.08	2.00	1.00	22.0~24.0	12.0~15.0	0.045	0.030	10×%C≤Nb≤1.10
S31040	型号 310Cb	0.08	2.00	1.50	24.0~26.0	19.0~22.0	0.045	0.030	10×%C≤Nb+Ta≤1.10
S31254	254 SM0	0.20	1.00	0.80	19.50~20.50	17.50~18.50	0.030	0.010	6.00~6.50Mo; 0.50~1.00Cu; 0.180~0.220N
S31635	型号 316Ti	0.08	2.00	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.030	5×%(C+N)≤Ti≤0.70; 2.0~3.0Mo; 0.10N
S31640	型号 316Cb	0.08	2.00	1.00	16.0~18.0	10.0~14.0	0.045	0.030	10×%C≤Nb+Ta≤1.10; 2.0~3.0Mo; 0.10N
—	型号 316HQ	0.030	2.00	1.00	16.00~18.25	10.00~14.00	0.030	0.015	3.00~4.00Cu; 2.00~3.00Mo
S31725	型号 317LM	0.03	2.00	1.00	18.0~20.0	13.5~17.5	0.045	0.030	4.0~5.0Mo; 0.10N

（续）

UNS 编号	型号/代号	化学成分①（质量分数,%）							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	其 他
非标准牌号									
S31726	17-14-4LN	0.03	2.00	0.75	17.0~20.0	13.5~17.5	0.045	0.030	4.0~5.0Mo；0.10~0.20N
S31753	型号 317LN	0.03	2.00	1.00	18.0~21.0	11.0~15.0	0.030	0.030	0.10~0.22N
S37000	型号 370	0.03~0.05	1.65~2.35	0.5~1.0	12.5~14.5	14.5~16.5	0.040	0.010	1.5~2.5Mo；0.1~0.4Ti；0.005N；0.05Co
S38100	18-18-2（XM-15）	0.08	2.00	1.5~2.5	17.0~19.0	17.5~18.5	0.030	0.030	—
S63008	21-4N	0.48~0.58	8.00~10.00	0.25	20.0~22.0	3.25~4.50	0.030	0.04~0.09	0.28~0.50N
S63012	21-2N	0.50~0.60	7.0~9.50	0.25	19.25~21.50	1.50~2.75	0.050	0.04~0.09	0.20~0.40N
S63017	21-12N	0.15~0.25	1.00~1.50	0.70~1.25	20.0~22.0	10.50~12.50	0.03	0.03	0.15~0.25N
S63018	23-8N	0.28~0.38	1.50~3.50	0.60~0.90	22.0~24.0	7.0~9.0	0.04	0.015	0.28~0.35N；0.50Co
S63198	19-9 DL	0.28~0.35	0.75~1.50	0.03~0.8	18.0~21.0	8.0~11.0	0.040	0.030	1.0~1.75Mo；0.1~0.35Ti；1.0~1.75W；0.25~0.60Nb
N08020	20Cb-3	0.07	2.00	1.00	19.0~21.0	32.0~38.0	0.045	0.035	2.0~3.0Mo；3.0~4.0Cu；8×%C≤Nb≤1.00
N08024	20Mo-4	0.03	1.00	0.50	22.5~25.0	35.0~40.0	0.035	0.035	3.50~5.00Mo；0.50~1.50Cu；0.15~0.35Nb
N08026	20Mo-6	0.03	1.00	0.50	22.0~26.00	33.0~37.20	0.03	0.03	5.00~6.70Mo；2.00~4.00Cu
N08028	Sanicro 28	0.02	2.00	1.00	26.0~28.0	29.5~32.5	0.020	0.015	3.0~4.0Mo；0.6~1.4Cu
N08366	AL-6X	0.035	2.00	1.00	20.0~22.0	23.5~25.5	0.030	0.030	6.0~7.0Mo
N08367	AL-6XN	0.030	2.00	1.00	20.0~22.0	23.50~25.50	0.040	0.030	6.0~7.0Mo；0.18~0.25N
N08700	JS-700	0.04	2.00	1.00	19.0~23.0	24.0~26.0	0.040	0.030	4.3~5.0Mo；8×%C≤Nb≤0.5；0.5Cu；0.005Pb；0.035S
N08800	型号 332	0.01	1.50	1.00	19.0~23.0	30.0~35.0	0.045	0.015	0.15~0.60Ti；0.15~0.60Al
N08904	904L	0.02	2.00	1.00	19.0~23.0	23.0~28.0	0.045	0.035	4.0~5.0Mo；1.0~2.0Cu
N08925	Cronifer 1925hMo	0.02	1.00	0.50	24.0~26.0	19.0~21.0	0.045	0.030	6.0~7.0Mo；0.&~1.5Cu；0.10~0.20N
—	Cronifer 2328	0.04	0.75	0.75	22.0~24.0	26.0~28.0	0.030	0.015	2.5~3.5Cu；0.4~0.711；2.5~3.0Mo

①单一数值的为最大值，除非另有注明。 ②可选的。 ③名义成分。 ④UNS 命名尚未规定，此处命名见 ASTM A887，只是表示所用的形式。

性能和应用。铬-镍奥氏体不锈钢的屈服强度是相当适中的，并且可以与一些低碳钢的屈服强度相比。经退火的300系列钢的最低力学性能一般是：其屈服强度为205~275MPa(30~40ksi)、抗拉强度为520~760MPa(75~110ksi)以及伸长率为40%~60%。经退火的200系列合金有较高的屈服强度范围，为345~480MPa(50~70ksi)。在冷变形加工条件下更高的强度也是可能的，尤其在拉丝过程中，抗拉强度达1200MPa(175ksi)或更高都有可能。图2.7-2将300系列与类型430(铁素体)牌号这两者的变形加工硬化特征进行了比较。而200系列的变形加工硬化特征类似于图2.7-2中型号301和302。

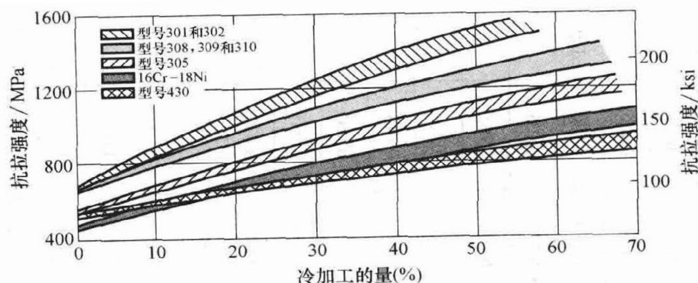


图2.7-2　冷轧对于所示不锈钢抗拉强度的一般性影响

即使较差的奥氏体不锈钢(例如型号302和304)在大气中、在许多水性介质中、在食品中以及在氧化酸(如硝酸)中，也具有一般的耐腐蚀性。型号321和347基本上是型号304里分别加入钛或铌而成的，以此稳定碳化物、防止敏化(见下节“热致脆化”)。在型号316/316L(见图2.7-1)中加入的钼，可形成在磷酸和乙酸及稀释的氯化物溶液里的耐点蚀能力，以及在亚硫酸中的耐腐蚀性。甚至更高的含钼量(如型号316L)和更高的合金含量，还能进一步增强耐点蚀的能力。氮的加入可提高在室温里、特别在低温下的强度(如型号304N)。氮的加入还是为了降低碳化铬的析出速率及随之对敏化的敏感度。将氮加入含钼的合金中，也是为了提高耐由氯化物引发的点蚀和裂隙腐蚀的能力。较高的含铬和/或镍量用于增强高温耐氧化的能力(如型号309、310和330)。铜和镍的加入(型号320)是为了提高耐还原酸，如硫酸腐蚀的能力。一些具有更高耐腐蚀能力的合金，如N08020(20Cb-3)含有足够高的含镍量(32至37%)，在UNS分类中被列为镍基合金。含镍、钼(质量分数,接近6%)和氮(w(N)0.15%~0.25%)的合金如图2.7-1所示，有时也称为“超级奥氏体”用于增强耐氯化物腐蚀的能力。

双相不锈钢

特性和成分。双相不锈钢就是属于Fe-Cr-Ni系统的双相合金。这种材料的显微组织一般是由近似相等比例的铁素体和奥氏体相构成的，而且是以其低含碳量(w(C)<0.03%)和加入钼、氮、钨和铜为特征的。一般铬和镍的含量(质量分数)范围分别从20%~30%和从5%~8%。表2.7-4列出了双相不锈钢的化学成分。双相不锈钢比传统300系列不锈钢的突出优点是其高强度(约两倍于奥氏体不锈钢)，提高了的韧性和塑性(与铁素体牌号相比)以及其颇具优势的耐氯化物SCC腐蚀和点蚀能力。

表2.7-4　双相不锈钢的化学成分

UNS编号①	型号/代号	化学成分②(质量分数,%)									
		C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N_2	其他
S31200/—	44LN	0.03	2.00	0.03	0.045	1.00	24.0~26.0	5.5~6.5	1.2~2.0	0.14~0.20	—
S31260/39226	—	0.03	1.00	0.030	0.030	0.75	24.0~26.0	5.5~7.5	2.5~3.5	0.10~0.30	0.10~0.50W, 0.20~0.80Cu
S31500/39215	—	0.03	1.2~2.0	0.03	0.03	1.4~2.0	18.0~19.0	4.25~5.25	2.5~3.0	0.05~0.10	—
S31803/39209	UR45N	0.03	2.00	0.02	0.03	1.00	21.0~23.0	4.5~6.5	2.5~3.5	0.08~0.20	—
S32304/39230	2304	0.03	2.5	0.04	0.04	1.0	21.5~24.5	3.0~5.5	0.05~0.60	0.05~0.20	0.05~0.60Cu
S32550/39255	—	0.03	1.5	0.03	0.04	1.0	24.0~27.0	4.5~6.5	2.9~3.9	0.10~0.25	1.5~2.5Cu
S32750/39275	2507	0.03	1.2	0.02	0.035	1.0	24.0~26.0	6.0~8.0	3.0~5.0	0.24~0.32	0.5Cu
S32760/39276	Zeron 100	0.03	1.0	0.01	0.03	1.0	24.0~26.0	6.0~8.0	3.0~4.0	0.30	0.5~1.0Cu, 0.5~1.0W
S32900/—	型号329	0.06	1.00	0.03	0.04	0.75	23.0~28.0	2.5~5.0	1.0~2.0	②	—
S32950/39295	7MoPlus	0.03	2.00	0.01	0.035	0.60	26.0~29.0	3.5~5.2	1.0~2.5	0.15~0.35	—

①某些双相不锈钢的UNS编号已被更换。例如S32950/39295表示原来的UNS编号(S32950)已改为S39295。　②无规定。

性能和应用。双相不锈钢的拉伸屈服强度范围为550～690MPa(80～100ksi)。这种高屈服强度使设计人员能将其作为在一定压力作用下或具有适当承载能力的薄壁材料上使用(由此导致重量的明显减小)。高合金含量及其里面铁素体基体的存在会使得双相不锈钢产生对脆化的敏感性和丧失机械强度尤其是长时间暴露在高温里所造成的韧性损失。为此，应用的温度上限一般低于300℃(570℉)。

就像所有不锈钢，成分在双相不锈钢的耐腐蚀性中发挥着主要作用。耐点蚀性是其中最容易受影响的。为测定由材料提供的耐点蚀性程度，通常用耐点蚀当量(PRE)为测定单位。PRE是按照加入能影响耐点蚀性的元素——即铬、钼和氮——的质量分数进行计算的，然后以1%Cr的影响将其进行规范化。耐点蚀当量最常用的公式为：

$$PRE = w(Cr) + 3.3w(Mo) + 16w(N) \quad (2.7\text{-}1)$$

如下表所列，双相不锈钢PRE值的范围从不含钼的大约24到较高合金含量牌号(Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-W-Cu)的40以上：

UNS编号	PRE范围
S31200	30.2～35.8
S31260	33.9～42.4
S31500	27.1～30.5
S31803	30.5～37.8
S32304	22.5～29.7
S32550	35.2～43.9
S32750	37.7～47.6
S32760	≥40
S32900	26.3～34.6

双相不锈钢在工业上有非常广泛的应用范围，特别在油气、石化、纸浆和造纸工业上。它们一般应用于水性的、含氯化物的介质，并能代替奥氏体不锈钢使用，后者不能正常使用于氯化物SCC或点蚀的用途。

析出硬化不锈钢

特性和成分。析出硬化(PH)不锈钢是一种铬-镍牌号钢，它们能通过时效处理进行硬化。这些牌号钢分成奥氏体(如A-286)、半奥氏体(如17-7PH)或马氏体(如17-4PH)，根据它们固溶退火的显微组织进行分类。半奥氏体合金经过热处理使奥氏体转变成为马氏体。有时也利用冷变形加工促使其时效反应。不同的合金元素如铝、钛、铌或铜都可用于实现时效。表2.7-5列出了PH不锈钢的化学成分。

性能和应用。就像可硬化的400系列马氏体不锈钢，PH合金能得到高达1700MPa(250ksi)的拉伸屈服强度。时效前先进行冷变形加工，还能取得甚至更高的强度。PH牌号一般都有良好的塑性和韧性，同时还有中等到良好的耐腐蚀性。其强度与耐腐性的结合程度要好于400系列的马氏体合金。这种性能上的改进与它们较高的铬、镍和钼含量以及对它们含碳量的限制(不超过0.040)有关。马氏体PH不锈钢的低含碳量对于良好的韧性和塑性尤其重要。由于其高强度，PH不锈钢的大部分应用都在航空航天及其他高科技工业上。

不锈钢的物理性质和力学性能

物理性能。不锈钢的物理性质与普通使用的非铁合金，如：铝、铜合金十分不同。然而不同种类的不锈钢与碳钢相比，存在着许多相似的性质，尽管两者有着关键性的差异。像碳钢一样，不锈钢的密度为接近8.0g/cm^3，约三倍于铝合金的密度(2.7g/cm^3)。而且像碳钢一样，不锈钢有高弹性模量(200MPa或30ksi)，大约是铜合金的两倍(115MPa或17ksi)和铝合金的三倍(70MPa或10ksi)。

这些材料之间的明显差别在于热导率、热膨胀和电阻率。图2.7-3所示就是热导率在不同类别的材料之间的大差别，6061铝合金(Al-1Mg-0.6Si-0.3Cu-0.2Cr)有非常高的热导率，然后依次为铝青铜(Cu-5Al)、1080碳钢和不锈钢。对于不锈钢，一般加入合金特别是镍、铜和铬都会使热导率降低。

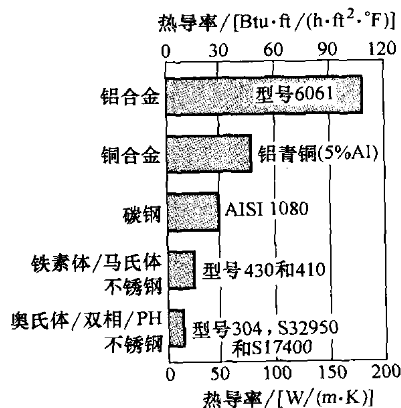


图2.7-3 碳钢、铜合金、铝与不锈钢的热导率比较

型号6061铝合金的热膨胀最大(见图2.7-4)，铝青铜次之，接着为奥氏体不锈合金、铁素体合金和马氏体合金。对于奥氏体不锈合金，加入镍和铜能降

表 2.7-5 析出硬化不锈钢的化学成分

UNS 编号	合金	化学成分[1](质量分数,%)								
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	其他
马氏体型号										
S13800	PH13-8Mo	0.05	0.10	0.10	12.25 ~ 13.25	7.5 ~ 8.5	2.0 ~ 2.5	0.01	0.008	0.90 ~ 1.35Al; 0.01N
S15500	15 ~ 5PH	0.07	1.00	1.00	14.0 ~ 15.5	3.5 ~ 5.5	—	0.04	0.03	2.5 ~ 4.5Cu; 0.15 ~ 0.45Nb
S17400	17-4PH	0.07	1.00	1.00	15.0 ~ 17.5	3.0 ~ 5.0	—	0.04	0.03	3.0 ~ 5.0Cu; 0.15 ~ 0.45Nb
S45000	Custom 450	0.05	1.00	1.00	14.0 ~ 16.0	5.0 ~ 7.0	0.5 ~ 1.0	0.03	0.03	1.25 ~ 1.75Cu; Nb≥8 × %C
S45500	Custom 455	0.05	0.50	0.50	11.0 ~ 12.5	7.5 ~ 9.5	0.50	0.04	0.03	1.5 ~ 2.5Cu; 0.8 ~ 1.4Ti; 0.1 ~ 0.5Nb
半马氏体型号										
S15700	PH15-7Mo	0.09	1.00	1.00	14.0 ~ 16.0	6.50 ~ 7.75	2.0 ~ 3.0	0.04	0.04	0.75 ~ 1.50Al
S17700	17-7PH	0.09	1.00	1.00	16.0 ~ 18.0	6.50 ~ 7.75	—	0.04	0.04	0.75 ~ 1.50Al
S35000	AM-350	0.07 ~ 0.11	0.50 ~ 1.25	0.50	16.0 ~ 17.0	4.0 ~ 5.0	2.50 ~ 3.25	0.04	0.03	0.07 ~ 0.13N
S35500	AM-355	0.10 ~ 0.15	0.50 ~ 1.25	0.50	15.0 ~ 16.0	4.0 ~ 5.0	2.50 ~ 3.25	0.04	0.03	0.07 ~ 0.13N
奥氏体型号										
S66286	A-286	0.08	2.00	1.00	13.5 ~ 16.0	24.0 ~ 27.0	1.0 ~ 1.5	0.025	0.025	1.90 ~ 2.35Ti; Al≤0.35; 0.10 ~ 0.50V; 0.0030 ~ 0.0100B
—	JBK-75[2]	0.015	0.05	0.02	14.5	29.5	1.25	0.006	0.002	2.15Ti; 0.25Al; 0.27V; 0.0015B

①单一数值为最大值除非另有注明。 ②典型值。

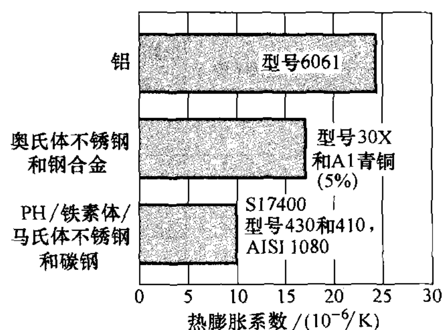


图2.7-4 碳钢、铜合金、铝和不锈钢热膨胀的比较

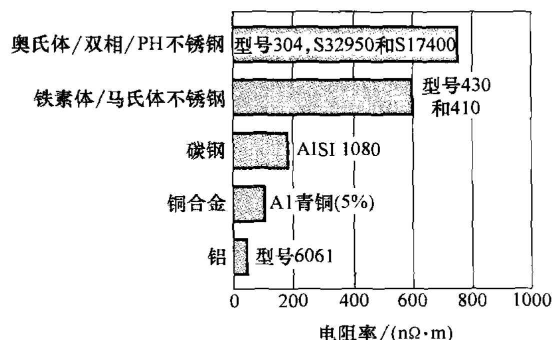


图2.7-5 碳钢、铜合金、铝和不锈钢的电阻率比较

低热膨胀。不锈钢有较高的电阻率(见图2.7-5)。合金元素的加入倾向于增加电阻率。所以，铁素体和马氏体不锈钢的电阻率低于奥氏体、双相和PH不锈钢，但是高于1080碳钢的电阻率。不锈钢的电阻率比铝青铜的大近7.5倍，而比型号6061铝合金大20倍左右。

力学性能。表2.7-6和表2.7-7列出了所选的几类具有代表性的不锈合金的拉伸性能和韧性。列为奥氏体合金的几种牌号比可热处理的合金有相对较低的屈服强度，但其拉伸塑性和韧性为最高。所列铁素体不锈钢(型号405和409)的拉伸屈服强度与奥氏体牌号的相似，但其抗拉强度、塑性和韧性的值要相对低一些。双相不锈钢的拉伸屈服强度是奥氏体和铁素体牌号的两倍，而韧性只有它们的一半左右。此外，它们的韧性远远超过那些经过热处理和硬化的合金。

表2.7-6 所选不锈钢最低室温力学性能

UNS编号	普通代号	抗拉强度		屈服强度①		伸长率(%)	断面收缩率(%)	最大硬度HRB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
退火奥氏体不锈钢								
S30100	301	515	75	205	30	40	—	88
S30200	302	515	75	205	30	40	—	88
S30215	302B	515	75	205	30	—	—	—
S30430	302Cu	450~585	65~85	—	—	—	—	—
S30300	303	585②	85②	240②	35②	50②	55②	—
S30323	303Se	585②	85②	240②	35②	50②	55②	—
S30400	304	515	75	205	30	40	—	88
S30403	304L	480	70	170	25	40	—	88
S30451	304N	550	80	240	35	30	—	—
S31651	316N	550	80	240	35	30	—	—
S30500	305	480	70	170	25	40	—	88
S30800	308	515	75	205	30	40	—	88
S32100	321	515	75	205	30	40	—	88
S34700	347	515	75	205	30	40	—	88
S34800	348	515	75	205	30	40	—	88
S30900	309	515	75	205	30	40	—	95
S30908	309S	515	75	205	30	40	—	95
S31000	310	515	75	205	30	40	—	95

（续）

UNS 编号	普通代号	抗拉强度		屈服强度[1]		伸长率(%)	断面收缩率(%)	最大硬度HRB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
退火奥氏体不锈钢								
S31008	310S	515	75	205	30	40	—	95
S31400	314	515	75	205	30	30	40	—
S31600	316	515	75	205	30	40	—	95
S31620	316F	585[2]	85[4]	240[2]	35[2]	40[2]	55[2]	—
S31700	317	515	75	205	30	35	—	95
S31703	317L	515	75	205	30	35	—	95
N08330	330	480	70	210	30	30	—	—
S38400	384	415～550	60～80	—	—	—	—	—
S38500	385	415～550	60～80	—	—	—	—	—
N08904	904L	490	71	220	31	35	—	95
N08366	AL-6X	515	75	205	30	30	—	—
S38100	18-18-2	515	75	205	30	40	—	96
N08700	JS-700	550	80	205	30	30	40	—
N08020	20Cb-3	585	85	275	40	30	—	95
S30453	304LN	515	75	205	30	—	—	—
—	308L	550[2]	80[2]	207[2]	30[2]	60[2]	70[2]	—
—	312	655	95	—	—	20	—	—
S31653	316LN	515[2]	75[2]	205[2]	30[2]	60[2]	70[2]	—
S31725	317LM	515	75	205	30	35	50	95
N08800	332	550[2]	80[2]	240[2]	35[2]	45[2]	70[2]	—
N08700	JS-700	550	80	240	35	30	40	95
高氮奥氏体不锈钢								
S20100	201	655	95	310	45	40	—	—
S20200	202	655	95	310	45	40	—	—
S20500	205	830[2]	120[2]	475[2]	69[2]	58[2]	62[2]	98[2]
S21600	216	690	100	415	60	40	—	100
S30451	304N	550	80	240	35	30	—	88
S30452	304HN	620	90	345	50	30	—	100
S31651	316N	550	80	240	35	30	—	95
S24100	Nitronic32	690	100	380	55	30	50	—
S24000	Nitronic33	690	100	415	60	40	—	—
S21900	Nitronic40	690	100	415	60	40	—	—
S20910	Nitronic50	825	120	515	75	30	—	—
S21800	Nitronic60	655	95	345	50	35	55	—
S28200	18-18Plus	760	110	415	60	35	55	—
S21400	Tenelon	860	125	485	70	40	—	—

(续)

UNS 编号	普 通 代 号	抗 拉 强 度		屈服强度①		伸长率(%)	断面收缩率(%)	最大硬度HRB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
退火铁素体不锈钢								
S40500	405	415	60	170	25	20	—	88
S40900	409	415	60	205	30	22③	—	80
S42900	429	450	65	205	30	22③	—	88
S43000	430	450	65	205	30	22③	—	88
S43020	430F	585 ~ 860	85 ~ 125	—	—	—	—	—
S43400	434	530②	77②	365②	53②	23②	—	83
S43600	436	530②	77②	365②	53②	23②	—	83
S44200	442	515	75	275	40	20	—	95
S44400	444	415	60	275	40	20	—	95
S44600	446	515	75	275	40	20	—	95
S44625	E-Brite26-1	450	65	275	40	22③	—	90
S44660	Sea-cure/SC-1	550	80	380	55	20	—	100
S44700	29-4	550	80	415	60	20	—	88
S44800	29-4-2	550	80	415	60	20	—	98
—	18SR	620②	90③	450③	65③	25⑤	—	≥90②
退火双相不锈钢								
S31200	44LN	690	100	450	65	25	—	—
S31500	—	630	92	440	64	30	—	30.5HRC②
S31803	UR45N	620	90	450	65	25	—	30.5HRC②
S32304	2304	600	87	400	58	25	—	30.5HRC②
S32550	—	760	110	550	80	15	—	31.5HRC②
S32750	2507	800	116	550	80	15	—	32HRC②
S32760	Zeron 100	750	109	550	80	25	—	—
S32900	型号 329	620	90	485	70	20	—	28HRC②
S32950	7Mo Plus	690	100	480	70	20	—	30.5HRC②
马氏体不锈钢								
S40300	403	485	70	205	30	25③	—	88
S41000	410	450	65	205	30	22③	—	95
S41008	410S	415	60	205	30	22	—	95
S41040	410Cb	485	70	275	40	12	35	—
S41400	414	795	115	620	90	15	45	—
S41800	418④	1450②	210②	1210②	175②	18②	52②	—
S42000	420⑤	1720	250	1480②	215②	8②	25②	52HRC②
S42200	422⑥	965	140	760	110	13	30	—
S43100	431④	1370②	198④	1030②	149②	16②	55②	—
S44002	440A	725②	105④	415②	60②	20②	—	95
S44003	440B	740②	107④	425②	62②	18②	—	96

（续）

UNS 编号	普通代号	抗拉强度		屈服强度①		伸长率(%)	断面收缩率(%)	最大硬度HRB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
马氏体不锈钢								
S44004	440C	760②	110④	450②	65②	14②	—	97
—	414L	795②	115④	550②	80②	20②	60②	—
S41610	416 PlusX	515②	75	275②	40②	30②	60②	—
析出硬化不锈钢								
S13800	PH13-8Mo⑦	1520	220	1410	205	6~10	—	≥45HRC
S15500	15-5PH⑧	1310	190	1170	170	—	—	—
S17400	17-4PH⑧	1310	190	1170	170	5~10	—	≥40HRC
S45000	Custom450⑧	1240	180	1170	170	3~5	—	≥40HRC
S45500	Custom455⑦	1530	222	1410	205	≤4	—	≥44HRC
S15700	PH15-7Mo⑧	1650	240	1590	230	1	—	≥46HRC
S17700	17-7PH⑦	1450	210	1310	190	1~6	—	≥43HRC
S35000	AM-350⑨	1140	165	1000	145	2~8	—	≥36HRC
S35500	AM-355⑨	1170	170	1030	150	12	—	≥37HRC
S66286	A-286⑩	896~965	125~140	655	95	4~15	—	≥24HRC

①0.2%条件屈服强度。 ②典型值。 ③厚度为1.3mm(0.050in)的延伸20%或以下。 ④260℃(500℉)回火。 ⑤205℃(400℉)回火。 ⑥中间和硬回火。 ⑦510℃(950℉)时效。 ⑧480℃(900℉)时效。 ⑨535℃(1000℉)时效。 ⑩730℃(1350℉)时效。

表2.7-7 所选不锈钢的拉伸和冲击性能

UNS 或 AISI 型号	状态		洛氏硬度	平均拉伸性能						夏比V形缺口冲击吸收功	
				0.2%条件屈服强度		抗拉强度		50.8mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)		
				MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft
奥氏体不锈钢											
型号304	退火		81HRB	241	35	586	85	60.0	70.0	≥325	≥240
N08020	退火		84HRB	276	40	621	90	50.0	65.0	271	200
S20161	退火		93HRB	365	53	970	140	59.0	64.0	≥325	≥240
S21800	退火		95HRB	414	60	710	103	64.0	74.0	≥325	≥240
铁素体不锈钢											
型号430	退火		82HRB	310	45	517	75	30.0	65.0	217	161
双相不锈钢											
S32950	退火		100HRB	570	82	760	110	38.0	78.0	157	116
马氏体不锈钢											
型号410	1010℃(1850℉)油淬再用以下温度回火	250℃(500℉)	43HRC	1089	158	1337	193	17.0	62.0	76	56
		593℃(1100℉)	26HRC	724	105	827	120	20.0	63.0	52	38

（续）

UNS 或 AISI 型号	状态		洛氏硬度	平均拉伸性能						夏比 V 形缺口冲击吸收功	
				0.2%条件屈服强度		抗拉强度		50.8mm (2in) 长的伸长率(%)	断面收缩率(%)		
				MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf·ft
马氏体不锈钢											
型号 420	1038℃(1900℉) 油淬再用 316℃(600℉)回火		52HRC	1482	215	1724	250	8.0	25.0	20	15
型号 440C	1038℃(1900℉) 油淬再用 316℃(600℉)回火		57HRC	1896	275	1975	285	2.0	10.0	2	3
析出硬化不锈钢											
S45500	1038℃(1900℉)水淬再用以下温度时效	482℃(900℉)	49HRC	1620	235	1689	245	10.0	45.0	12	9
		566℃(1050℉)	40HRC	1207	175	1310	190	15.0	55.0	47	35
S17400	1038℃(1900℉)水淬再用以下温度时效	482℃(900℉)	44HRC	1262	183	1365	198	15.0	52.0	21	16
		621℃(1150℉)	33HRC	869	126	1131	164	17.0	59.0	75	55

表 2.7-6 和表 2.7-7 所列的马氏体合金的强度、塑性和韧性有很大的变化范围。在退火状态下，它们的性能与铁素体合金的相似，但随含碳量的增加其强度提高而塑性降低。含碳量较高的合金，如型号 420 和 440C 一般用低温即≤330℃(625℉)回火使其强度达到最大。相反，型号 410 可以在很大的温度范围 260～650℃(500～1200℉)里回火。

PH 合金如马氏体牌号 S45500 和 S17400，具有比 400 系列马氏体合金更高的退火强度和更低的塑性，并在 480～620℃(895～1150℉)的温度范围里进行时效。它们的强度取决于硬化剂(钛、铌和铜)、硬化剂的含量以及所用的时效温度。在一定的强度条件下，其韧性类似于或超过 400 系列马氏体合金。

选用的因素

可以根据耐腐蚀性、加工特性、从市场上得到的容易程度、在特定的温度范围里的力学性能以及产品的成本来选择不锈钢。然而对于给定的用途，耐腐蚀性和力学性能通常是选择牌号的最重要因素。

在为一特定的用途选择适用的不锈钢型号时，应该考虑的包括以下这些特征：

- 耐腐蚀性；
- 抗氧化和硫化性；
- 在周围介质和使用温度下的强度和塑性；
- 拟用加工方法的适用性；
- 拟用清洁工序的适用性；
- 在使用中的性能稳定性；
- 韧性；
- 耐磨料磨损、侵蚀、擦伤和咬死的能力；
- 表面粗糙度和/或反射率；
- 物理特征，如磁学性质、热导率和电阻率；
- 锐利度或切削刃的保持性；
- 刚性；
- 尺寸稳定性。

耐腐蚀性。这通常是不锈钢最重要的特征，但是对于特定的用途，如何评价往往却是最为困难的事情。对纯化学溶液的一般耐腐蚀性是比较容易确定的，而实际环境则复杂得多。

像 SCC、严酷空间或涂层下的裂隙腐蚀、点蚀以及敏感材料的晶间侵蚀如焊接热影响区，都属于局部性腐蚀形式，与之相对应的一般腐蚀往往并不像这种局部性腐蚀那么严重。这种局部性腐蚀会造成意外的、有时甚至是灾难性的失效，尽管其实大部分的组织未曾受到影响，但在设计和选择适当牌号的不锈钢时必须予以审慎的考虑。当媒介中存在着看似十分微小的杂质时，也会使腐蚀突发性地剧增，虽然这种杂

质难以预料，甚至只有百万分之几的浓度含量，但由其引起的主要影响有：热量在钢与腐蚀性介质之间相互传递、不同种类的金属材料间的接触、散杂电流以及其他许多细微的因素。在高温中的侵蚀会因大气中看似微小的变化而加剧，这些变化会引起氧化皮的生成、硫化或炭化作用。

尽管情况复杂，但还是可以根据基本经验选用一种能适用于大部分用途的钢，也许还可就此借助钢材生产商的帮助。而实验室的腐蚀数据也会误导所预期的实际应用功能。即使是实际应用数据也有其局限性，因为就是相似的媒介也会由于一些前面所述腐蚀条件的细小变化而发生相当大的差异。对于困难的应用，有必要对各种对比数据进行广泛深入的研究，有时还要经过中试厂或现场的试验。为一个腐蚀性用途选择一种不锈钢，其他必须考虑的重要因素还有：

- 腐蚀性媒介包括杂质的化学成分；
- 介质的物理状态：液体、气体、固体或它们的组合；
- 温度；
- 温度的变化；
- 介质的通风性；
- 介质的含氧量；
- 介质的细菌含量；
- 介质的电离化；
- 介质中泡沫的重复形成和破灭；
- 介质与钢之间的相对运动；
- 金属的化学成分；
- 显微组分的性质和分布；
- 金属在媒介中裸露的连续性；
- 金属的表面状态；
- 在媒介裸露过程中，金属内部的受力；
- 金属与一种或多种不相似金属材料的接触；
- 散杂电流；
- 电位差；
- 船底海洋生物的生长；
- 金属表面的污泥沉淀；
- 加热有机化合物的碳沉淀；
- 显露表面的尘土；
- 焊接、硬钎焊和软硬钎焊的作用。

有关应用于各种腐蚀介质里的不锈钢选择的更详细内容可参阅本章中的“锻压不锈钢的腐蚀性”。

力学性能。显然，在使用温度中的力学性能是很重要的，但还必须考虑在其他温度里其使用功能的满意度。于是作为在极地使用的产品，必须具有在零度以下的适用性能，尽管常态工作温度要高得多；对于像锅炉、喷气发动机的一些用途里，经过持续高温工作之后的室温性能也应当很重要，因为它们会间断性停机。

耐磨损和耐擦伤。不锈钢的特点就是耐磨损和耐擦伤的性能比较差，但是它们正是因为其耐腐蚀性而往往成为某种特定用途之所需。因此对设计工程师而言，找到能承受磨损和擦伤的最有效的合金或许是一个困难的问题。润滑剂和涂层常用于减少磨损，但是在许多用途里润滑剂是要禁止使用的，例如在高温环境里，油膜会破裂以及要求卫生的食品或药品处理设备。除此之外，如在发电厂里的阀门的一些关键零件必须要耐擦伤和咬死，因为它会使全厂停机或造成危险。表2.7-8和表2.7-9列出了所选的不锈钢的磨损配伍性和耐擦伤性的比较。

表2.7-8　不相似不锈钢相配时的配伍性

合　金	体积损耗/mm³						
	型号304 (99HRB)	型号316 (91HRB)	S17400 (43HRC)	S24100 (95HRB)	S20910 (99HRB)	S21800 (95HRB)	型号440 (57HRC)
型号304	16.4	—	—	—	—	—	—
型号316	13.5	16.4	—	—	—	—	—
S17400	31.7	23.7	67.7	—	—	—	—
S24100	10.8	12.1	22.1	9.5	—	—	—
S20910	11.5	12.2	20.1	10.6	12.8	—	—
S21800	7.7	5.5	6.9	4.1	4.5	3.6	—
型号440C	5.3	5.0	14.6	4.0	5.5	3.1	4.9

注：根据交叉圆柱磨损试验ASTM G83，105r/min，10000r，71N(16lbf)(每1000转的重量损耗经转化为总体积损耗)。

表 2.7-9 所选不锈钢的擦伤应力门槛值

Alloy	状态和名义洛氏硬度	型号410		型号416		型号430		型号440C		型号303		型号304		型号316		S17400		S24100		S21800	
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
型号410	回火（38HRC）	21	3	28	4	21	3	21	3	28	4	14	2	14	2	21	3	317	46	345①	50
型号416	回火（36HRC）	28	4	90	13	21	3	145	21	62	9	165	24	290	42	14	2	310	45	345①	50
型号430	退火（84HRB）	21	3	21	3	14	2	14	2	14	2	14	2	14	2	21	3	55	8	248	36
型号440C	回火（56HRC）	21	3	145	21	14	2	76	11	34	5	21	3	255	37	21	3	345①	50	345①	50
型号303	退火（82HRB）	28	4	62	9	14	2	34	5	14	2	14	2	21	3	21	3	345①	50	345①	50
型号304	退火（77HRB）	14	2	165	24	14	2	21	3	14	2	14	2	14	2	14	2	207	30	345①	50
型号316	退火（81HRB）	14	2	290	42	14	2	255	37	21	3	14	2	14	2	14	2	21	3	262	38
S17400	时效（84HRB）	21	3	14	2	21	3	21	3	14	2	14	2	14	2	14	2	345①	50	345①	50
S21800	退火（94HRB）	345①	50	345①	50	248	36	345①	50	345①	50	345①	50	262	38	345①	50	345①	50	345①	50

注：根据 ASTM G98 销块试验，无润滑的磨削粗糙度；其试验条件和硬度适用于水平轴和垂直轴。

①未擦伤。

制造和清洗。通常会为了某种制造特性，例如切削性、成形性或焊接性的需要而选择特定的不锈钢。甚至会根据一种所要求或优选的清洗方法来确定特定型号的选择。举例说，一种焊接件要求经过某介质（如硝酸-氢氟酸）的清洗，而这种介质却能侵蚀其具有敏感性的不锈钢，为此该焊接件就应当采用经稳定化的或低碳不锈钢制造生产，尽管其敏感性并不会对使用性能产生影响。

表面粗糙度。在不锈钢选择依据中，还有一些特征只对某些特殊的用途来说是很关键的，而对除此以外的其他用途却是无关紧要的。其中，表面粗糙度就是仅次于耐腐蚀性的重要特征。不锈钢有时就是根据其能达到的各种良好的表面粗糙度进行选择。而表面粗糙度又可根据其外观、摩擦特性或卫生状况进行选择。表面粗糙度对于卫生状况的影响有时比实际想象的简单，可以通过几种选定的粗糙度进行试验。粗糙度的选择反过来又能影响合金的选择，因为不同型号的不锈钢有其不同的粗糙度可行性或耐用性。

产品型式

厚板。它是宽度大于254mm(10in)和厚度不小于4.76mm(0.1875in)的平轧或锻压的产品。不锈钢厚板一般都生产成退火状态，还要经过喷砂清理或酸洗。喷砂清理后，一般还要进一步在适当的酸液中清除从轧机中取出时所粘附的铁屑一类表面污染物。

薄板。一种成卷的或按长度切断的平轧产品，其宽度不小于610mm(24in)，而厚度小于4.76mm(0.1875in)。不锈钢薄板几乎可以按所有的型号生产，除了易切削钢和某些马氏体钢的牌号以外。

带材。一种成卷的或按长度切断的平轧产品，其宽度小于610mm(24in)、厚度为0.13～4.76mm(0.005～0.1875in)。厚度为0.13mm(0.005in)和宽度小于610mm(24in)的冷轧材料同时符合带材和箔材的定义，故应用时两种名称可通用。

冷轧不锈钢带材是用热轧、退火和酸洗的带材（或剖切薄板）经过光洁的轧辊轧制而成。根据所需的厚度，在轧机上通过不同次数的轧制才能达到必要的压缩量，并获得所需要的表面特性和力学性能。

热轧不锈钢带材是用热轧扁坯或方坯生产得到的半成品，并用于通过冷轧加工成为成品的带材。

箔材。一种成卷的平轧产品，其厚度厚至0.13mm(0.005in)，宽度小于610mm(24in)。箔材生

产的边缘宽度经剖剪成为相应于3号(剖剪后不经修整的)的边缘条件和带材的5号(剖剪后再经轧制或修锉而成方形的)边缘条件。

棒材。它是以直形长度形式供货的热或冷轧制品，而且可以有不同的截面形状、尺寸和表面粗糙度。其品种包括尺寸不超过127mm(5in)的小型型材和厚度最小为3.2mm(0.125in)、宽度至254mm(10in)的热轧扁形轧件。

热轧棒材一般将钢锭热轧、锻压或轧制成为中间尺寸的扁坯或方坯，然后再热轧、锻压或挤压到其最终尺寸。至于无论选用热轧、锻压或挤压中的哪一种作为其最后的加工方法取决于多种因素，包括其成分和最终尺寸。

冷轧棒材是用热轧棒材或杆料经过进一步的加工(如冷轧或冷拔)而成的产品，以此实现更为严密控制的尺寸、更光滑的表面粗糙度以及更强的抗拉强度和屈服强度。同样作为棒材的冷轧坯料的尺寸和形状与热轧棒材基本上是一样的，例外的是，所有厚度小于4.76mm(0.1875in)且宽度超过9.5mm(0.375in)的冷轧扁坯料都归类为带材。

线材。这是用热轧和退火的杆料经过冷轧得到的成卷产品。冷轧能获得极佳的尺寸精度、良好的表面光滑度和粗糙度及各种特定的力学性能。线材可经多次的回火和精轧进行生产。

当轮廓为完全的圆柱形时，线材照例指的是圆线材；当其轮廓为其他形状时，则指的是异型线材。异型线材是通过拉制或拉制与轧制相结合的冷精加工方法制造的。

特种线材制品。有许多品种的不锈钢线材开发用于一些专用的零件和特定的用途。这些线材制品的独特性质就是利用其成分、钢材的质量、工艺热处理和冷拉的特定工艺组合而成的。

冷镦线材可采用不同型号的不锈钢材料中的任何一种制造。在所有的各种情况下，冷镦线材都要经受特殊的试验和检验，以确保它们在冷镦和冷锻的工序中都具有令人满意的性能。

铬-镍族中的型号305和302Cu可作为冷镦线材使用，一般也是强力镦粗所必须使用的材料。其他一般用于冷成形的型号包括303Se、304、316、321、347、384、410、420、430和431。

弹簧钢丝是用退火杆料拉制而成。生产弹簧钢丝的不锈钢型号通常包括302、304、316以及20Cb-3(N08020)。

大尺寸的弹簧钢丝的拉制可以涂以各种不同的涂料，如干拉铅、铜、石灰和皂液或氧化物和皂液。细尺寸通常用湿拉，尽管也可以用干拉。

绳索钢丝用于制造绳索、缆绳和各种用途的细绳，例如飞机控制钢索、船用钢绳、电梯钢缆、吊索和锚绳。绳索钢丝用型号302和304制造，除非有更高耐腐蚀性要求，否则一般选用316。若有特殊的无磁性特性要求，则需要选择显微组织中极少或没有铁素体或马氏体的熔炼钢和采用特殊的拉制工艺，以此限制或避免因其转变为马氏体而引起的变形。

编织用钢丝用于筛网的编织，应用于煤矿、砂砾坑、造纸厂、化工厂、乳品厂、炼油厂以及食品加工厂的许多不同的用途。在退火和最终拉制中必须予以仔细控制，以保证在每一卷或绕轴上，钢丝都经受均匀一致的回火和精整加工。因为编织钢丝必须有塑性，所以通常在烧炼回火过程中，使其得到光亮退火的精整加工，或者在软回火的过程中处以石灰-皂液精整加工或油-拉或脂-拉的精整加工。大部分的不锈钢型号都适用于编织用钢丝。

许多型号都可用作不锈钢焊丝，并且在优化其焊接件的力学性能和耐腐蚀性的前提下具有良好的焊接性。不锈钢焊丝按照层叠绕成卷轴和直形长度(两者均遵照美国焊接学会AWS A5.9的规定)生产供货，以及涂敷焊条(AWS A5.4)。

半成品。初轧坯、方坯和扁坯经过热轧、热锻或热轧成为具有近似的横截面尺寸，且一般均为圆角。也有生产成圆坯的，一般用于挤压或闭合模锻。这些半成品还有管坯，其长度都是按随机生产的或者按规定的长度或重量切段的。所谓的粗轧坯和方坯之间，并没有不变的区分界线，而且常互换使用。

初轧坯、方坯和扁坯的名义尺寸是以时及一时的分数值进行定义的。一般列出的热轧不锈钢初轧坯、方坯和扁坯的大小范围包括方形截面100×100mm(4×4in)及以上，且横截面的矩形截面积最少为10300mm^2(16in^2)。

管线(pipe)、管材(tubes)和管件(tubing)。它们是用圆钢钻孔或用轧制再焊接而成的。它们用于输送气体、液体和固体，以及各种各样的机械和结构方面用途(这里面不包括作为储存和运输使用的圆柱形容器,和铸管状产品)。

管线与管材的主要区别在于，前者通常按照相对较少的标准尺寸进行生产。无论是与管线还是与管材相比，管件对其尺寸、粗糙度、化学成分和力学性能一般都要按照更为精确的技术标准进行生产。

不锈钢管形产品按所适合的用途分类如下：

- 耐一般性腐蚀性使用的不锈钢管件；
- 不锈钢的压力管线；

- 无缝压力钢材；
- 不锈钢卫生用管件；
- 不锈钢机械用管件；
- 不锈钢航空用管件；
- 航空结构用管件；
- 航空液压管路用管件。

缺口韧性和相变温度

不锈钢缺口试棒冲击试验无论是不锈钢型号还是试验条件，其试验结果都可能会表现出很大的离散性，故只能用于描述不同等级的一般性特性。

奥氏体型号具有优良的缺口试棒冲击性能。所有的奥氏体型号在室温里一般都有 150J(110lbf · ft)或更高的夏比冲击吸收功(表 2.7-7)。低温对于缺口韧性只有很小的影响或没有影响。通常，奥氏体不锈钢甚至在非常低的温度下还能保持在 130J(95lbf · ft)的值以上(表 2.7-10)。相反，冷变形加工会降低所有温度下的冲击性能。

表 2.7-10 所选退火奥氏体不锈钢的低温性能

合 金	温 度		0.2%条件屈服强度		抗 拉 强 度		长度为4D时的伸长率(%)	断面收缩率(%)	夏比V形槽冲击吸收功	
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf · ft
型号305	23	74	234	34	545	79	77	82	325	240
	—73	—100	324	47	876	127	82	79	294	217
	—196	—320	365	53	1358	197	66	69	237	175
型号384	23	74	214	31	503	73	63	82	325	240
	—73	—100	303	44	683	99	97	79	316	233
	—196	—320	4211	61	1027	149	90	77	225	166
S21904 (21-6-9)	24	75	359	52	696	101	53	73	325	240
	—79	—110	607	88	1007	146	52	72	289	213
	—196	—320	972	141	1510	219	35	34	129	95
S28200 (18-18Plus)	24	75	476	69	827	120	65	75	325	240
	—73	—100	648	94	1138	165	64	74	285	210
	—196	—320	1000	145	1641	238	16	30	38	28

马氏体和铁素体不锈钢的耐冲击性随温度的降低而降低，而且其断口形貌从中等高温的塑性模式变化为低温的脆性模式。这种断口变化正是马氏体和铁素体材料的特征。在这种不锈钢里，上平台能量和下平台能量都不会受热处理的很大影响。然而，发生相变的整个温度范围是要受热处理、成分的微小变化和冷变形加工的影响。造就高硬度的热处理可以将相变温度范围向较高处偏移，而造就低硬度的热处理可以将相变温度范围向较低处偏移。

断裂韧度

断裂韧度数据对用于许多标准型号的不锈钢并不适用。大部分的试验都针对高强度马氏体 PH 不锈钢，因为这些材料都被应用于一些关键性的用途，这时可发现断裂韧性试验对于材料的评价是最有效的。虽然 K_{Ic} 值取决于试验条件、试件的方向性及材料的状态(热处理)，但其研究还是表明马氏体 PH 钢的平均 K_{Ic} 值范围约为从 50 ~ 120MPa · $m^{1/2}$(45 ~ 110ksi · $in^{1/2}$)。

奥氏体不锈钢的断裂韧度(原文如此,效应为冲击韧度,下同。—译者注。)数据的作用是很有限的,这是由于这种牌号钢的高塑性和高韧性。利用J-积分法(J_c为初始韧性值)可以求得断裂韧度数据,其单位为kJ/m^2。型号304和316不锈钢的大范围断裂韧性试验表明它们极具抗断裂性。这两种型号都能在很大的不同状态范围里展现其塑性的断裂性能,但J_c值有很大变化范围,一般室温下的范围为169~1660kJ/m^2,在大约400℃(750℉)时的范围为130~1420kJ/m^2。

疲劳性能

疲劳裂纹的开裂。其试验就是一个试件或零件在经受循环载荷的作用下直至失效的过程。在此试验中,全部中的大部分循环次数都经历着裂纹的开裂。虽然用小试件进行的裂纹开裂试验并不能精确地决定一个大型零件的疲劳寿命,但试验还是可以为一种不锈钢的内在疲劳裂纹开裂提供数据,从而可以将数据用于作为推算在工程设计中防止发生疲劳失效的临界值。在锅炉和压力容器、复杂焊合、铆钉或螺栓连接结构以及汽车航空的零部件的疲劳设计规范里,都能找到这种应用小试件的疲劳试验数据的例子。影响疲劳寿命的因素包括温度、试件方向(如纵向或横向)、热处理(如退火或淬硬)、硬度和表面状态(见图2.7-6)。

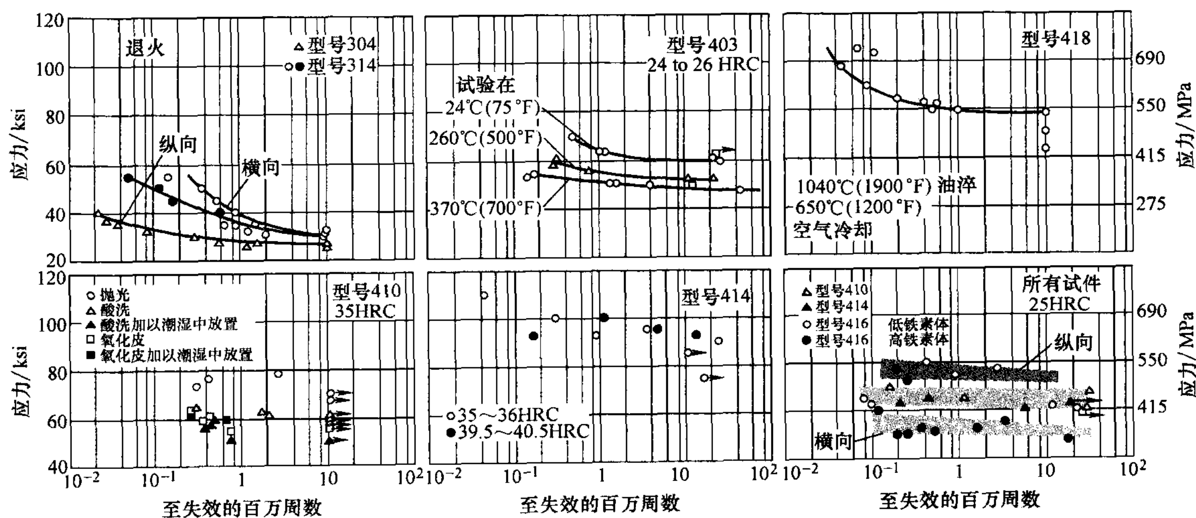


图2.7-6　影响不锈钢疲劳性能的因素

有三种可用于获得不锈钢的疲劳性能数据的疲劳试验。其中最为常用的试验是旋臂试验,它的加载方式与转轴和轮轴的承载方式最为接近。挠性疲劳试验用于评价薄板的性能而且它对于钢板弹簧的作用模拟性最为接近,可以预期它们只发生挠曲而不发生变形或断裂。轴向载荷试验使疲劳试件单向受载,其载荷的变动范围可以从完全交变(拉伸到压缩)到脉动(拉伸到拉伸),并能实现从最大到最小任何实际可能的应力比。一般来说,疲劳条件包括从拉-压加载(应力比R在0与−1之间,似应为+1与−1之间——译者注)到拉-拉加载(应力比R在0与+1之间),在相同最大应力值条件下,前者的疲劳寿命比后者短。

疲劳裂纹扩展(FCG)。奥氏体不锈钢的FCG速率得到广泛的研究,并且在高温结构零件中获得普遍应用,其应力循环涉及很大的频率、温度、环境和载荷比的变化范围。在断裂力学原理的基础上分析FCG试验的结果,以此编制奥氏体不锈钢的疲劳裂纹扩展的数据采集文本——特别是型号304和316。其数据处理方法也适用于双相牌号,马氏体牌号,马氏体、半奥氏体以及奥氏体PH不锈钢。图2.7-7所示就是状态(退火与冷变形加工)和温度对型号304不锈钢的FCG速率的影响。这种疲劳表明经冷变形,加工试件的高ΔK裂纹扩展速率比退火试件的更低。在427℃(800℉)温度里,试验的裂纹扩展速率要高于在室温里试验的相应试件。

高温力学性能

许多不锈钢——特别是奥氏体型号304、309、310、316、321、330和347,某些马氏体析出硬化型号如PH15-7Mo、15-5PH、17-4PH、17-7PH、AM-350和AM-355,以及某些马氏体型号如所谓的“超级12铬”钢,它含有钼(w(Mo)高至3%)、钨(w(W)高至3.5%)和/或钒——都广泛应用于高温的用途。如图2.7-8所示,奥氏体型号能在比其他型号不锈钢更

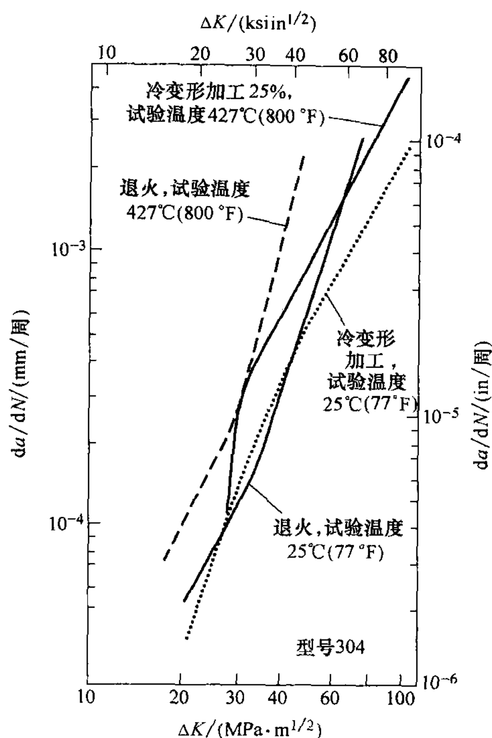


图2.7-7 型号304不锈钢的退火和冷作加工的两种状态，分别在25和427℃(77和800 ℉)、0.17Hz及应力比R为0时的疲劳裂纹扩展速率

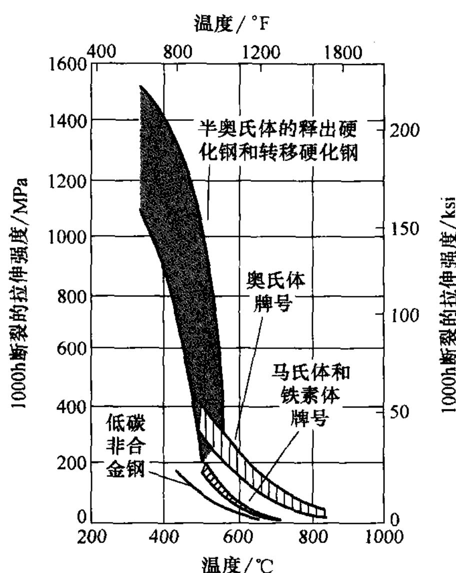


图2.7-8 奥氏体、马氏体和铁素体不锈钢的高温强度特性与低碳非合金钢、半奥氏体释出硬化钢及转移硬化钢的比较

高的温度(高至815℃或1500℉)里保持其强度。奥氏体不锈钢的牌号H按其规定，具有最好的蠕变强度和蠕变断裂强度。这种钢中w(C)为0.04%~0.10%(表2.7-3)，并且是在足够高温度里退火的固溶体，故能提高其蠕变性能。

阀门钢是奥氏体氮强化钢，广泛应用于汽车/内燃机的气门。这类合金钢的例子包括21-2N(21Cr、8Mn、2Ni + N)、21-4N(21Cr、9Mn、4Ni + N)、21-12N(21Cr、12Ni、1.25Mn + N)和23-8N(21Cr、8Ni、3.5Mn + N)(表2.7-3)。这些合金中的w(N)范围为0.20%~0.50%。这种发动机阀门牌号钢应用温度高达760℃(1400 ℉)，但是在其高端温度里，只有相当低的强度能力。

如“热感应脆化”一章所述，长期在高温中的使用会造成奥氏体不锈钢的脆化(敏感度)，并由此降低材料耐腐蚀和感应脆化的能力。更为经常的是这种能力的降低是由像碳化物和σ的二次相的析出而造成的。其析出取决于时间和温度：一定温度下的较长时间和较高温度，都会促使在更大范围的析出。

热致脆化

不锈钢在热态中处理或在高温中使用的过程中很容易受脆化的影响。不锈钢的这些热敏脆形式包括敏感性、475℃(885℉)脆化和σ-相脆化。

敏感性

当在高温的处置过程中沿晶界形成碳化铬时，不锈钢就会很容易发生晶间腐蚀。这种铬在晶体边界上的损耗即所谓的敏感性，是因为合金对于腐蚀性介质中的局部侵蚀变得较为敏感。

奥氏体不锈钢。当温度高于大约1035℃(1900℉)时，碳化铬完全溶解于奥氏体不锈钢里。然而当这些钢从高温慢慢冷却或再加热到425~815℃(800~1500℉)时，就会在晶体边界上析出碳化铬。这种碳化物比其基体含有更多的铬。

碳化物的析出会使边界附近的铬基体贫化。在析出温度里，铬在奥氏体中缓慢扩散，因此贫化区持续下去并使合金对晶界腐蚀更敏感化。其敏感化是由于在许多环境中贫铬区都比基体有更高的腐蚀速率。敏感性还会造成韧性的降低。

如果奥氏体不锈钢快速冷却到大约425℃(800℉)以下，碳化物将不会析出，钢也不会再发生晶间腐蚀。为消除应力将合金再加热到425~815℃(800至1500℉)将会造成碳化物的析出和对晶间腐蚀的敏感性。碳化物析出的最大速率发生在大约

675℃(1250℉)。因为这是碳素钢和合金钢消除应力的常用温度，所以为了消除其应力，必须慎重选择在不同种类金属之间进行连接的不锈钢。

焊接是不锈钢对晶间腐蚀产生敏感性的常见原因。尽管焊缝本身及与之直接相邻的基体金属的冷却速度都要足够高，以避免发生碳化物的析出，但焊接热的循环将使部分热影响区(HAZ)深入到析出范围。致使碳化物析出，在焊缝处发生一些析出的区域将对晶间腐蚀产生敏感。焊接并不总是使奥氏体不锈钢敏感化。对于一些很薄的截面，即使在敏感化温度里放置足够长的时间，热循环也不会使之形成任何导致碳化物析出的 HAZ。一旦发生析出，就可通过将合金加热到 1035℃(1895℉)再快速冷却予以消除。

控制奥氏体不锈钢的含碳量或加入某些能比铬形成更稳定的碳化物的元素，以此消除它们对于晶间腐蚀的敏感性。对于大部分的奥氏体不锈钢，限制其 $w(C)$ 在 0.03% 以下，将能防止在焊接和大多数热处理的过程中产生敏感性。这种方法对于消除因长时间在 425~815℃(800 至 1500℉)的温度里工作而引起的敏感性是无效的。

钛和铌能比铬形成更加稳定的碳化物，将其加入不锈钢形成这种稳定的碳化物，它们可以从固溶体里除去碳并防止碳化铬的析出。最常见的这类稳定的不锈钢牌号为型号 321 和 347。型号 321 至少含有(5×(C+N))的钛，而型号 347 至少含有(8×C)% 的铌。当用钛作为稳定剂时，必须考虑到氮，这并不是因为氮化铬会成为奥氏体不锈钢里的一个问题，但是因为氮化钛是非常稳定的。钛将能结合所有可能的氮，所以当要确定用于与碳结合所需的总钛量时，必须考虑这种反应。

同样长时间处于 425~815℃(800~1500℉)的温度里，由于稳定型牌号比低碳钢牌号更不敏感，故当用途为处于上述温度时，则稳定型牌号当属首选材料。为达到最大的耐晶间腐蚀能力，这些牌号要用大约 900℃(1650℉)的温度进行稳定化热处理。处理的目的是利用钛、铌碳化物稳定而碳化铬不稳定的温度从固溶体里去除碳。如此处理，可以当钢处于较低的温度里时防止碳化铬的生成。

铁素体不锈钢。铁素体不锈钢的晶间腐蚀机制，在很大程度上可以认为与奥氏体不锈钢是一样的。铬化合物在晶体边界的析出和由此造成在晶体直接毗邻的晶界处发生铬的损耗。这种含铬量的降低将导致一些氧化固溶体里的腐蚀速度的加快，而这种氧化固溶体常用于评价晶间腐蚀性的。

奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢对晶间腐蚀的敏感性有若干不同之处。第一，氮在奥氏体里的溶解度足够高，故氮化铬的析出不是奥氏体不锈钢发生晶间腐蚀的关键性原因。然而对于铁素体不锈钢，这却成了关键性原因。第二是发生的温度。奥氏体不锈钢里的敏感性是加热到 425~815℃(800 至 1500℉)时才产生的。在传统的铁素体合金里，其敏感性是加热到 925℃(1700℉)以上而造成的。这种差别是碳和氮在铁素体和奥氏体里的相对溶解度的结果。

在铁素体不锈钢里，防止晶间侵蚀的最直接的方法是限制它们碳和氮的间隙原子含量。例如最新开发的第三代铁素体合金如 26Cr-1Mo 和 29Cr-4Mo(表 2.7-2)具有低间隙原子含量，即分别为 20ppmC 和 100pppmN。稳定型牌号也有助于防止敏感化。钛和铌两种稳定型钢都可以用，且各有优点。一般来说，含钛合金的焊接塑性似乎更好一些，但是铌钢的韧性更好一些。不过，并不推荐钛稳定型合金在硝酸中使用，而含铌钢是能够在这种介质里使用。

双相不锈钢。含有低含碳量($w(C)$ 为 0.03%)以及大约相等的奥氏体和铁素体的双相不锈钢，具有非常好的抗敏感性。

475℃脆化

当将 $w(Cr)$ 为 13%~90% 的铁-铬合金保持在 550 至 400℃(1020 至 750℉)的温度里或在该范围里缓慢冷却时，其对脆化是很敏感的。被称之为 475℃(885℉)脆化的这种现象可以提高抗拉强度和硬度，但降低其拉伸塑性、冲击强度、电阻率和耐腐蚀性。

铁-铬铁素体和双相铁素体-奥氏体不锈钢会发生 475℃ 脆化，但奥氏体牌号的则不会。在 475℃(885℉)时效 20~120h，由于均匀析出而造成快速硬化。若连续时效 120~1000h，硬化速度大大减慢。在这个时效的过程中，析出会增强。时效超过 1000h，则由于析出物的稳定性，而使硬度几乎不增加。

即使是经过严重脆化的合金，475℃脆化也是可逆的。通过再加热到 675℃(1250℉)或更高可使其性能在数分钟里得以恢复。脆化的程度将随含铬量的增加而提高，然而 $w(Cr)$ 低于 13%，脆化可以忽略不计。合金以碳化物形式的添加，如钼、钒、钛和铌看来都能增加脆化，尤其对于较高的含铬量。碳、氮含量的增加也能增强脆化，当然对其非脆化的性能是不利的。在 475℃脆化处置以前，冷变形加工将加速脆化，尤其对含铬较高的合金。

σ 相脆化

在长期处于约 560~980℃(1050 至 1800℉)的铁

素体、奥氏体和双相不锈钢里，σ相的形成在冷却到室温后会造成相当大的脆化。σ相是一种大约相当于FeCr的铁-铬化合物，它具有四方晶体结构且硬度大约相当于68HRC(940HV)。因为其脆性，σ相常常在压痕过程中发生断裂。

σ相的形成可以通过：①从温度1040～1150℃(1900～2100℉)缓慢冷却；②从1040～1150℃(1900～2100℉)水淬，再加热到560～980℃，而以加热到850℃(1560℉)得到的效果为最好。钢冷却到260℃(500℉)之后，脆化最为不利。在较高的温度里，含有σ相的不锈钢通常能承受法向设计应力。然而冷却到260℃或以下，就会造成其韧性几乎丧失殆尽。

σ相的存在会大大增加对缺口的敏感性，尤其是在铁素体不锈钢和含有一些铁素体的奥氏体合金里。σ相的存在通常不会对硬度和抗拉强度产生严重的影响，但冲击强度会受到很大的影响。在高温下，σ相能发挥出强化作用，然而在高温下含有σ相合金的冲击强度要低于在室温下不含σ相合金的。

在工业用的奥氏体和铁素体不锈钢中，即使含有少量的硅也会明显地加快σ相的形成。一般来说，所有能稳定铁素体的元素都能促进σ相的形成。钼有着与硅相似的作用，铝的作用要小一些。增加铬的含量也有利于σ相的形成。少量的镍和锰能加速σ相的形成，但大量的则会稳定奥氏体，故延缓其形成。碳的加入由于形成碳化铬而减少固溶体中的含铬量，因此影响σ相的形成。钨、钒、钛和铌的加入也会促使σ相的形成。

可以预料，σ相在铁素体里比在奥氏体不锈钢里更容易形成。由于高的固溶退火温度所造成的粗大晶粒会延缓σ相的形成，先期的冷变形加工使其形成增强。冷变形硬化加工对σ相形成的影响取决于冷变形加工的程度及其对重结晶化的影响。如果在工作温度里的冷变形加工程度足以产生重结晶化，则σ相的形成就会得到增强。如果不发生重结晶，σ相的形成速度将不受影响。少量的冷变形加工不会促进重结晶化，故实际上会延缓σ相的形成。

双相合金通常有高的含铬量(w(Cr)为25%～27%)和含钼量(w(Mo)为2%～4%)。于是如果它们不能快速冷却通过900～700℃(1650至1290℉)，则这些合金将有助于金属间化合物，如σ相和(X)的形成。虽然这些金属间化合物确实会影响合金的耐腐蚀能力，但它们对于力学性能有更加深刻的影响。如果双相合金能得到令人满意的力学性能，那么它也许不会发生晶间腐蚀。

精选参考文献

书

- J.R. Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, ASM International, 1994.
- P. Lacombe, B. Baroux, and G. Beranger, Ed., *Stainless Steels*, Les Éditions de Physique, 1993.
- R. Lula, Ed., *Stainless Steel*, American Society for Metals, 1986.
- D. Peckner and I.M. Bernstein, Ed., *Handbook of Stainless Steels*, McGraw-Hill, 1977.
- *Steel Products Manual: Stainless and Heat-Resistant Steels*, Iron and Steel Society, Nov 1990.

手册文献

- Elevated-Temperature Mechanical Properties of Stainless Steels, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p 123–145.
- R. Johansson, Fatigue and Fracture Properties of Duplex Stainless Steels, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 757–768.
- S. Lampman, Fatigue and Fracture Properties of Stainless Steels, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 712–732.
- Low-Temperature Properties, *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1994, p 495–504.
- J.H. Magee, Wear of Stainless Steels, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol 18, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, p 710–724.
- Metallurgy and Properties of Wrought Stainless Steels, *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1994, p 13–65.
- W.J. Mills, Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steels and Their Welds, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 733–756.
- Physical Properties, *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1994, p 489–494.
- S.D. Washko and G. Aggen, Wrought Stainless Steels, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 841–907.

第2节 锻压不锈钢的加工

锻压不锈钢的加工与碳素钢和合金钢的加工有很大的差别，因为不锈钢：①强度、硬度和塑性都比较高；②比较容易被加工硬化；③一般成品上必须有一种耐腐蚀的表面。上述特征决定了加工要使用更大的功率，加工的设备需较频繁地维修和更新，以及所采用的工艺方法要能尽量降低或消除表面的污染物。

成形加工

应该根据所采用不锈钢型号的特点和成形零件厚度选择其成形加工的方法。如同前述，成形不锈钢所要求的功率大于成形碳素钢所要求的功率——特别奥

氏体型号，其变形加工硬化比铁素体型号的快得多。对同样厚度的零件，碳素钢可以用冷压成形加工的，不锈钢也许有必要采用温压成形或热压成形加工。

奥氏体型号由于其高塑性，是最容易成形的不锈钢：奥氏体不锈钢薄板可以深度拉深。奥氏体型号201和301的双向拉伸超过35%，因为在变形过程中部分转变为马氏体而有助于防止颈缩的发生，故变形也更为均匀（对于少数重度的成形，可能需要调整其成分以适应其特定的加工要求，并有必要缓慢成形以防产生热和丧失马氏体效应）。铁素体和低合金马氏体型号也可以广泛用于冷压成形。但是其塑性不如奥氏体型号，于是这种合金的成形受到更多的限制，也许有必要增加中间退火。含碳量较高的马氏体型号如440A、440B和440C只能进行有限的冷压成形。双相不锈钢比与之相对应的奥氏体不锈钢有更高的强度，故在冷压成形工序中需用更大的加载。由于延伸较少，故它们必须有比全奥氏体材料更大的成形半径。凡是在其使用环境里有可能发生应力腐蚀开裂的合金，其深度冷压成形（>15%）的截面应该充分地退火和淬火。

不锈钢一般比其他钢更容易擦伤，故在成形过程中要更多地注意其润滑。由于在成形中发生的滑移接触，用纯矿物油很少能形成适当的润滑，常使用加了极压添加剂的润滑油。借助于有效的清洁装置和合适的润滑，可以将在成形和搬运过程中造成的表面污染降低到最小限度。

冷压成形的不锈钢零件通常是在成形后直接使用的。然而在会发生应力腐蚀开裂的用途里，作为对这种失效过程比较敏感的奥氏体型号应当在成形后进行固溶退火用于消除残余应力。在一切使用条件（除最缓和的以外）下，热压成形的零件都要求进行成形后的退火，以便恢复其耐腐性和/或塑性。

锻造

所有标准型号的不锈钢都能进行锻造。然而在一定的种类范围里，随合金含量的增加锻造会变得困难。最为常见的锻造困难发生在高合金钢锭的粗轧开坯，需要采取预防措施防止表面破裂。

加工温度。图2.7-9所示是大部分标准不锈钢的一般性锻造温度。由于奥氏体自身的可加工性以及不存在同素异形的转变，故大部分普通奥氏体型号能使用很大的锻造温度范围。常用的18-8型号常在高达1260℃（2300℉）的温度进行锻造。然而用于较高合金牌号的上限温度要降低一些，因为较高的温度会引起金相变化而造成表面破裂。其中型号309、310和330的这个上限温度为最低。遵从上限温度极限对于钢锭的粗轧开坯来说特别重要，因为如果突破这个温度就会沿铸造金属的晶界发生撕裂。

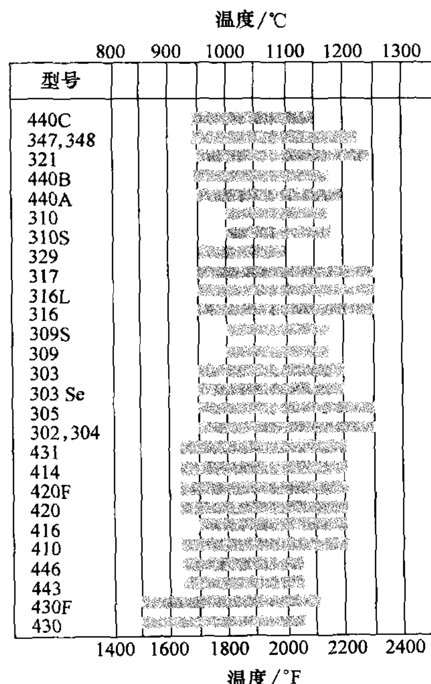


图2.7-9 不锈钢的典型锻压温度范围。图中向上面的合金更难以热加工，而向下面的则较为容易加工

含有少量的δ-铁素体会降低某些奥氏体型号的锻造性——特别是镦锻，此时一些切向的拉力垂直于铁素体板条。型号304、309、316、317和321尤其可能含有数量可观的铁素体，因此对于重度锻造的用途建议限制这类牌号的铁素体数量。铁素体对于钢锭的粗轧开坯来说尤其麻烦，在1150℃（2100℉）左右的温度进行均质处理是有益处的，即在加热到锻造温度之前使δ-铁素体转变为奥氏体。

奥氏体不锈钢应该进行固溶退火，以此恢复其耐腐蚀性和最高塑性。对于某些用途来说，如果结束加工的温度是在870℃（1600℉）以上，然后为防止碳化物的析出而让锻件快速冷却到425℃（800℉）以下，退火则可以省却。使用这种方法应慎重，应结合金相检查，确认有害的碳化物析出确实已制止。稳定型型号（321、347和348）和特别低碳型号（304L和316L）将不会随便析出碳化物，如果不求得到最大耐腐蚀性和塑性的话，就可直接以锻造状态使用而不必有所顾虑。

较低碳马氏体不锈钢能在很大的温度范围里进行热变形加工。其终锻温度仅受制于同素异形转变，其

起始温度接近800℃(1500℉)。较高碳型号(420和440)的锻造温度范围也较为窄小，这是由于其较低的热塑性。因为所有的马氏体型号都有高淬硬性，它们要求锻造后进行某种热处理(一般为退火)。如果不是为了得到较高的硬度而是为了得到最佳耐腐蚀性的话，马氏体型号在投入使用前都还应进一步热处理，只有型号410能以退火状态使用，这是其例外。

如图2.7-9所示，铁素体钢的锻造温度范围是很宽的。因为铁素体型号容易晶粒增大和组织脆弱，其终锻温度要比奥氏体稍低一些。终锻温度必须严格控制的仅限于型号405、430和442。这些合金由于生成少量奥氏体而造成晶界脆弱，为此要求予以特别的重视。其他铁素体型号一般可以低至700℃(1300℉)终止锻造。对于全铁素体型号，如型号446，应该至少要有10%的最后压缩量(超过更好)留在870℃(1600℉)以下进行，以此获得晶粒的细化并形成室温下的最佳塑性。建议铁素体锻造后进行退火，因为在锻造状态下它们中的大部分都含有相当大量的脆性马氏体，尽管从硬度测量上看可能并不明显。

冷变形加工

大部分的不锈钢都能成功地进行冷变形加工工序，包括冷镦头、冷拔、冷挤压和冷铆。由于强度和加工硬化上的差异，不锈钢的冷变形加工比碳素钢的更为困难，要求的动力要求也更大。

冷镦头。鉴于一些不锈钢在变形加工硬化能力上的很大差异，一些型号比另一些更适合用于冷镦头。较为常见的冷镦牌号包括奥氏体型号302、304、305、316、321和384，铁素体和马氏体型号410、430和431也能用于冷镦头。一种最为广泛应用的冷镦头不锈钢为UNS S30430，也有些冷镦工程师将其定名为302HQ。其成分类似于型号304，只是含3%~4%Cu(质量分数)，使其冷变形加工硬化的特征明显缩减。

零件的表面粗糙度很大程度上取决于钢丝的粗糙度，故建议用易拉钢丝而不要用退火钢丝。成形压力随形状剧变而增加，而且当镦粗形状剧变时，其模具的润滑也很困难。铁素体和低碳马氏体型号的冷镦特性类似于碳素钢或低合金钢。

用奥氏体和铁素体不锈钢制成的冷镦头零件最常以镦头后的状态应用，虽然如果使用条件容易造成应力腐蚀开裂就需要对其进行退火。马氏体型号镦头后通常要进行热处理。

切削加工

作为一个类别来讲，不锈钢比碳素钢和低合金钢更难以进行切削加工，这是因为它们较高的强度和较高的形变加工硬化率(具有“粘胶”属性)。这些特征要求较大的动力和较低的切削速度，还会缩短刀具寿命，甚至难以在切削表面获得高等级的表面粗糙度。不同的不锈钢在这些特征方面存在着很大的差异。

工艺方法。在不锈钢的切削过程中。为了控制强度和变形加工硬化的影响，必须特别关注加工的设备。有必要使用刚性的设备和刀具以免发生震颤。尤其在切削奥氏体和高合金的铁素体型号时，由于会产生韧性、带状的切屑，一般推荐使用带卷屑结构的刀具。使用高速钢和硬质合金切削刀具，都能在生产切削速度下得到满意的刀具寿命。

以下预防措施可防止形变加工硬化。一定不要用工具对其表面进行无切削的蹭磨或研光，否则表面会被加工硬化到一定程度，以致刀刃尚未切入表面就被烧伤。此外还要小心确保由前一工序引起的硬化不能影响后续的切削加工。例如利用三点冲眼而不是常见的中心冲眼为孔定位，以免将来使钻头首先要接触的那一点被加工硬化。

用比切削低合金钢更强力的进给和更低的切削速度进行切削，以此可将变形加工硬化降低到最低限度。

型号的变型品种。低合金马氏体和铁素体不锈钢具有与低合金钢非常相似的切削特征，因此较高碳马氏体不锈钢也就属于最难切削的金属之列。奥氏体和析出硬化不锈钢的每一种切削特征都具有比铁素体和马氏体型号大得多的变化范围。最容易切削的是易切削合金，它们含有易切削添加剂，由其形成一些能明显改善整个切削特征的夹杂物。

低合金马氏体和铁素体不锈钢的组织会使其变得有些脆，因此理所当然地形成一种好的断屑。然而达到的硬度一般高于退火的低合金钢。低合金马氏体不锈钢常必须在调质的状态(高达38HRC)下切削，因此能得到优异的尺寸精度和表面粗糙度。

较高碳的马氏体不锈钢如型号420和440特别是440C，依次较难以切削，因为其高退火硬度(高达240HB)和在其显微组织中存在硬的、有磨粒作用的碳化铬。高铬铁素体不锈钢如型号446的难切削是像奥氏体型号一样因为它们的“粘性”及生成带状切屑。

奥氏体不锈钢如型号304和316在退火状态下具有550~620MPa(80~90ksi)的抗拉强度——退火的碳素钢1050具有相同的强度范围。然而奥氏体不锈钢所表现的是屈服强度和抗拉强度之间相当大的差距以及很高的加工硬化率——特别为较低合金的型号如

302 和 304。双相钢的切削性受制于它们的退火强度，一般认为它们比大多数的标准奥氏体型号更不易切削。

析出硬化型号依据其组织的不同有相当大的切削特征变化范围。它们可以是铁素体、马氏体、奥氏体或双相的，其切削特征也只存在于切削那一时刻的组织特征。就像马氏体型号，析出硬化不锈钢有时需热处理至高强度再进行切削，这也是为了使加工出的零件尺寸公差比热处理前就进行切削的更小。

如前所述，易切削不锈钢明显比其相应的非易切削不锈钢更容易切削，因为它们含有少量的各种易切削添加剂。最为常见的添加剂是硫，以此可以尽量减少积屑瘤在刀具刃口上的形成并促其断屑，从而也可以达到更高的切削速度、更少的动力消耗以及更长的刀具寿命。硫是作为一种非金属的夹杂物而存在的，通常为复合硫化锰。硒是不锈钢第二常用的易切削剂，具有类似于硫的作用，但是还能得到更好的表面粗糙度。硒还能比硫进一步提高易切削不锈钢的冷压成形性和一些耐腐蚀性。其他易切削添加剂包括碲、铅和铋。然而由于其热变形加工性的下降、在钢中难以形成均匀组织(夹杂物的形态)和/或毒性等方面的问题，含有这些元素的合金在工业上的实际应用十分有限。

由于切削加工在劳务和资本方面的高额成本，易切削不锈钢的经济效益还是相当可观的。易切削型号的价格要稍微贵一些，但是当只要求进行粗略的切削时，在切削加工成本上的节省尚不足以对其进行补偿。一般来说，如果其用途里 10% 以上的材料都要被切除，则使用易切削型号在成本上还是划算的。

为了保证零件在使用中的满意度，必须对易切削型号的特征予以慎重的考虑。由易切削添加剂的加入所引起的在性能上的降级包括耐腐蚀性、横向塑性和韧性、热变形加工性以及焊接性。在某些情形里，一些基本易切削合金的变型品种可以获得切削性与它的其他重要性能的最佳搭配。然而，当选用一种合金时，还是必须在各种不同性能之间进行权衡，即切削的容易度必须与其他重要性能如耐腐蚀性的可能降低进行平衡。

表 2.7-11 列出了一些属于铁素体、马氏体和奥氏体家族的非易切削和易切削合金。目前双相钢或析出硬化钢的家族里还没有易切削合金可供利用。因为双相合金被认为具有优良的耐腐蚀性但是其热变形加工性有些不足，易切削添加剂的加入又不可行，因为这会使上述两种性能下降。同样，析出硬化合金也被认为有高的强度且不失其良好的韧性，以致它也不能加入易切削剂，因为它也会致使韧性下降。

表 2.7-11　可供使用的易切削不锈钢牌号

非易切削合金	相关易切削合金	
	含硒	含　　硫
铁素体		
S43000	S43023	S43020
S44400	—	S18200①，S18235
马氏体		
S41000	S41623	S41600，S41610②
S42000	S42023	S42020
S44004	S44023	S44020
奥氏体		
—	—	S20300
S30200/S30400	S30323	S30300，S30310②，S30345③，S30360④
S30430	—	S30330，S30431⑤
S31600	—	S31620
S34700	S34723	S34720

①不含钛。　②含高锰。　③含铝。　④含铅。　⑤含低铜。

热处理

不锈钢要根据型号和使用要求进行不同的热处理。包括退火、硬化和应力消除在内的这些处理，可以让由于前期制造而改变的金属恢复所要求的性能如耐腐蚀性和塑性。热处理通常在可控气氛中进行，以防止对表面产生不利影响。

退火。所有的不锈钢型号都可以进行退火。奥氏体型号的退火并不仅仅是为了晶粒的重结晶化和金属的软化，而是也让碳化铬进入奥氏体的固溶体里。因为后一种效应，有时也称此工艺为固溶退火。温度必须超过一中间范围来防止由于碳化物沿晶界析出而造成的敏感性。退火温度通常在 1040℃（1900℉）以上，因为对于某些型号其细晶粒大小十分重要，故此时退火温度要严格控制低至 1010℃（1850℉）。保持温度的时间要短，以使表面的氧化皮最少并能控制晶粒的生长，否则会导致“橘皮”的形成。

奥氏体不锈钢的退火偶尔也称为淬火退火，因为金属必须快速冷却，通常用水淬，以防止敏感性(除稳定的和超低含碳量的型号以外)。碳化铬的析出会严重削弱耐腐蚀性，因为基体里直接靠近碳化物处的铬被消耗掉和/或因为碳化物本身也会引发电化腐蚀。

因此要是不用水淬，就需要进行彻底检查以确保不发生敏感性。这种检查必须考虑到实际成分，因为碳化物的析出速度明显随成分而变化：一种 $w(C)$ 为 0.05% 的型号 304 钢在冷却条件下可以不发生析出，而 $w(C)$ 为 0.08% 的同样合金将会产生严重的敏感性。奥氏体不锈钢可通过在退火温度下的重结晶化而软化，与大部分其他钢不同的淬火并不能使其硬化。

型号 321、347 和 348 在经过常规退火后，有时还要进行稳定化退火。当这些型号以常规的方式进行退火时，在型号 321 中的大部分碳含量都与钛化合在一起，而型号 347 和 348 的则是与铌化合在一起。在 870 ~ 900℃（1600 ~ 1650℉）温度下进一步退火 2 ~ 4h，再快速冷却就能尽可能使所有的碳以碳化钛或碳化铌析出，以此防止随后碳化铬的析出。可以相信，当使用条件极具腐蚀性——尤其当使用温度约为 400 ~ 870℃（750 ~ 1600℉）时，这种特殊的保护性处理有时还是很有效的。

在对奥氏体不锈钢进行退火或其他热处理之前，钢应当经过清洗以去除油、脂及其他含碳残留物。这些残留物会导致在热处理过程中发生渗碳，从而降低其防腐蚀的能力。

所有的马氏体和大部分的铁素体不锈钢都可以通过将其加热至铁素体温度范围的上面部分进行亚临界退火（过程退火），或者通过加热超过临界温度并进入奥氏体范围再继之以缓慢冷却进行完全退火。亚临界退火的常用温度为 760 ~ 830℃（1400 ~ 1525℉），而完全退火的温度为 845 ~ 900℃（1550 ~ 1650℉）。当材料如同在热变形加工中被预先加热到临界温度之上时，甚至在像型号 430 那样的铁素体不锈钢里也至少会存在一些奥氏体。为了产生所需要的铁素体软化组织和球化碳化物，则需要从完全退火的温度以大约 25℃/h 的相对缓慢速度进行冷却或者在亚临界退火温度里保持 1h 或更长。然而，完全退火以后仅进行过冷变形加工的零件用不到 30min 就可以完成令人满意的亚临界退火。

在整个加工温度范围里，主要保持单相组织的铁素体型号（型号 409、442、446 和 26Cr-1Mo）仅仅要求进行在 760 ~ 955℃（1400 ~ 1750℉）的范围里短期重结晶化退火。含铬量较高的型号如 446 和 26Cr-1Mo，则要求快速冷却在 540 ~ 370℃（1000 ~ 700℉）的范围里通过，以免发生“885℉”的脆化并因之丧失塑性。

硬化。马氏体不锈钢非常像较低合金钢，可通过奥氏体化、淬火和回火进行硬化。奥氏体化温度正常为 980 ~ 1010℃（1800 ~ 1850℉）——明显超过临界温度。淬火后的硬度随奥氏体化温度提高直到约 980℃（1800℉）而提高，随后因奥氏体的残留而降低。对某些型号，最佳奥氏体化温度取决于后续的回火温度。

为防止在高碳型号里和在低碳型号的复杂截面上产生裂纹，建议在奥氏体化之前进行预热。在 790℃（1450℉）中预热，然后加热到奥氏体化温度是最常用的工艺；但有时对于非常大或极其复杂的零件，还要在奥氏体化之前先在 540℃（1000℉），然后在 790℃（1450℉）中进行预热。

马氏体不锈钢由于其高合金含量而具有高淬硬性。从奥氏体化温度进行空气冷却通常适合于生产全硬度。有时使用油淬，尤其用于较大的截面。回火温度必须根据硬度、韧性和耐腐蚀性的最佳组合进行选择。零件一旦冷却到室温就应当立刻回火——尤其如果使用油淬——以此防止产生裂纹。有时零件要在回火前冷冻到 -75℃（-100℉），用于转变残留奥氏体——尤其是对于尺寸稳定性很重要的零件，例如用型号 440C 制造的量块。超过 510℃（950℉）温度的回火应该继之相对快速地冷却至 400℃（750℉）以下，以此躲开“885℉”的脆化。

某些析出硬化不锈钢要求用比标准马氏体更为复杂的热处理。例如，半奥氏体析出硬化型号会要求退火、固溶处理（以此调节冷却至室温的奥氏体转变）、低温处理（完成奥氏体转变）以及时效（使合金完全硬化）。相反，马氏体析出硬化型号所要求的通常不会超过任何一种简单的时效处理。

应力消除。当不锈钢在焊接之后不可能进行完全退火时，其焊接件一般要加热到低于一般的退火温度，用于降低高残余应力。最为常见的是，应力消除应用于因为太大或过于复杂而无法采用完全退火的焊接件，或应用于将奥氏体不锈钢焊接在合金钢上而构成的不同金属焊接件。温度低于 400℃（750℉）的应力消除是可以接受的工艺，但是只能达到中等程度的应力消除。

在温度 425 ~ 925℃（800 ~ 1700℉）里的应力消除能显著减少残余应力，但另一方面却会造成使用中的应力腐蚀开裂和尺寸不稳定。在 870℃（1600℉）中，处理 1h 一般能消除大约 85% 的残余应力。然而，在该温度范围里的应力消除也会在晶界析出碳化物，从而导致其在多种介质里的耐腐蚀性遭到严重削弱的敏感性。经敏感化的奥氏体不锈钢甚至在一些相当缓和的介质中，也很容易遭受晶间腐蚀或受应力助长的晶间腐蚀。为防止这种影响，强烈推荐使用稳定型不锈钢（型号 321、347 或 348）或低碳型号（304L 或 316L），

特别是当要求进行漫长应力的消除。

当奥氏体不锈钢经冷变形加工形成高强度时，消除低温应力将提高比例极限和屈服强度（特别是压缩屈服强度）。正常情况下在345～370℃（650～700℉）处理2h，如果用途不要求耐晶间腐蚀的能力，则处理温度可提高至425℃（800℉）。较高的温度将降低强度并使金属敏感化，一般在冷变形加工产品的应力消除中不予采用。

马氏体或铁素体不锈钢焊接件通过在其焊缝和热影响区的同时回火进行应力的消除，对于大部分的型号还能在一定程度上恢复其耐腐蚀性。然而，用于这些牌号的退火温度相对较低，如果焊接件必须进行热处理，则通常选用的也就是正常的亚临界退火。

连接工艺

不锈钢一般采用焊接、硬钎焊和软硬钎焊进行连接。电弧焊是不锈钢与不锈钢连接的首要选择，因为它是一种高效率的连接并相对地不易产生裂隙。如果要使完整的组合达到最佳的耐腐蚀性和力学性能，重要的是要让工艺操作和工艺措施能适应不同型号的不锈钢。硬钎焊通常也适用于将不锈钢连接到不同种类的金属上。

焊接。实际上所有型号不锈钢都适宜采用各种焊接工艺来进行焊接。工艺的选择常部分地决定于可以使用的设备。也许最简单和最通用的焊接工艺就是使用涂料焊条的手工焊条电弧焊（SMAW），它可用于材料薄至1.2mm（0.05in），而厚度的上限不受限制。其他常用于不锈钢的工艺有钨极气体保护电弧焊（GTAW）、熔化极气体保护焊（GMAW）、埋弧焊（SAW）、药芯焊丝电弧焊（FCAW）及多种的电阻焊。等离子弧焊（PAW）、激光束焊（LBW）和电子束焊（EBW）工艺也有所应用。不锈钢很少用气焊进行连接。在不锈钢的氧乙炔焊中，要求有很高的技艺来控制焊接气氛，以防止焊缝熔池的氧化或炭化。不论如何选择焊接工艺，必须要考虑的主要因素有：①焊缝和热影响区的耐腐蚀性；②残余应力，它会导致扭曲变形、焊接开裂或裂隙；③马氏体和铁素体型号不锈钢在其焊缝和热影响区的力学性能。

奥氏体型号是最可焊接的不锈钢，但也是与碳素钢、低合金钢在焊接性能方面差别最大的不锈钢。在计划奥氏体不锈钢焊接件时，应当考虑的最重要的冶金学因素也许是在中等高温下它对晶界碳化物析出的敏感性（敏感度）。将毗邻焊缝的材料加热到退火温度或以上，就不会发生析出了。将根据焊接参数离开焊缝一定的距离——也许3mm（⅛in）或以上——的基体金属加热到650～870℃（1200～1600℉），这时尽管在此温度的时间很短，也会有晶界碳化物析出。碳化物的大量析出会削弱在许多介质中的耐腐蚀性，包括为去除氧化物而最为常用的酸洗用的酸。尽管如此，由于敏感性也只是发生在热效应区的一个十分窄小的区域里，故许多奥氏体不锈钢焊接件还是可以放心地以焊接状态予以使用。

硬钎焊。所有的不锈钢都能进行硬钎焊，这种工艺常用于将不锈钢连接在其他金属上。各种硬钎焊技术都可适用，但是炉硬钎焊比任何其他技术都用得更多，因为它使硬钎焊在保护介质（通常为氢气或真空）中进行，以防止不锈钢的氧化。奥氏体型号的大部分硬钎焊都是在敏感性的温度范围里进行的，硬钎焊之后再进行固溶退火是不可能的。因此，如果应用条件会导致敏感化材料发生晶间腐蚀，就必须使用稳定型或超低碳型号。在马氏体和铁素体型号的硬钎焊中，通常要使用熔点低于临界温度830℃（1525℉）的钎料金属，以免马氏体发生硬化。硬钎焊的热量将使经硬化的马氏体不锈钢回火，并可能使其软化。

事实上，所有的钎料金属包括银、镍、金和铜合金都可使用。然而，高磷、铜基钎料金属应该避免使用，因为它们会对不锈钢产生有害的影响。某些奥氏体型号（如21Cr-6Ni-9Mn）不应该使用任何铜基钎料金属，因为在其硬钎焊过程中，熔化铜会侵蚀不锈钢。

在硬钎焊过程中，有可能发生不锈钢的破坏性穿透。如果在高应力条件下进行硬钎焊，会在一些型号不锈钢中造成某种形式的应力腐蚀开裂。通过硬钎焊前的退火、在达到硬钎焊温度之前足够缓慢地加热零件，可以使应力得以消除，或选用能抑制这种穿透发生的钎料金属均可以避免在硬钎焊过程中发生破坏性穿透。如果使用熔点高于980℃（1800℉）的高温钎料合金也会发生晶界穿透。借助于选用一种良好的钎料金属、尽量少用钎料合金和缩短保温时间可以使这个问题尽量化解。通过或接近硬钎焊接缝的焊接也会造成不锈钢的穿透，应当予以避免。

使用添加了镍和锡的银硬钎焊合金，将有助于将处于某种腐蚀介质如海水中的硬钎焊接缝的裂隙腐蚀减小到最低限度。硬钎焊应当在不会流动的保护气氛中进行。

软钎焊。虽然只要使用的技术得当，所有的不锈钢就都能用软钎焊连接，但这些材料一般都不采用软钎焊，因为它们要应用于一些包含高强度和/或耐腐蚀/热的用途。尽管如此，不锈钢的软钎焊还是能在建筑、食品处理和管道中得到很好的应用。就像硬钎

焊，必须将氧化铬膜仔细去除来提高其软钎焊性。用于连接不锈钢的软钎焊工艺种类包括烙铁软钎焊（软钎焊烙铁或烙铁头）、焊炬软钎焊、炉和红外软钎焊、浸渍软钎焊、电阻软钎焊、感应软钎焊和激光软钎焊。

用于连接不锈钢的主要软钎焊合金为锡-铅合金。纯锡、锡-锑和锡-银可用于食品处理和其他用铅会有毒的用途里。

焊接中的预防措施

涉及不锈钢焊接最明显的问题就是要在焊缝区域和与之邻近的基体金属区域保持均匀一致的耐腐蚀性。这个问题一般是通过严密控制成分和焊接条件来予以解决的。有时候要求通过焊后热处理来恢复其耐腐蚀性在焊接过程中所发生的变化——尤其是在遭受敏感化的材料里。

敏感化（有害碳化物的析出）。如需要可用下列之一的方法防止：

- 焊接后的固溶退火。用于消除任何残余应力，并改善焊缝金属本身的组织及其耐腐蚀性。然而，固溶退火及退火后所必需的酸洗既增加成本又很不方便。变形会成为一个严重问题，尤其是当利用水淬来保证在冷却过程中不发生一般的碳化物析出时。对于大型焊件，如槽罐和压力容器，焊后退火是不可能。
- 含碳量的限制。如含碳量足够低，则碳化物就不会在焊缝的热影响区析出。在美国，常用的超低含碳量不锈钢如型号 304L 和 316L（w(C) 最高为 0.030%），如此低的含碳量对于要消除应力的焊接件也是必要的。甚至把最高含碳量严格限制为最高 0.030% 也不能完全防止在含较高镍的合金或在任何经过轻微冷变形加工的奥氏体不锈钢里产生敏感性和丧失耐腐蚀性。最高含碳量 0.050% 的限制将能防止在大部分焊接条件下特别在小截面上，产生于热影响区的敏感性。含钼型号如 316 和 317，由于在强氧化腐蚀性介质如热硝酸中形成的晶界 σ 相，其热影响区即使无碳化物析出也会对晶界腐蚀产生敏感。当含钼牌号的焊接件在氧化介质中使用时，通常的做法是对每一炉次经腐蚀试验的敏感化试件进行晶间腐蚀的敏感性评价。
- 碳的稳定化。通过将碳束缚在碳化钛（如型号 321）里或在碳化铌（型号 347 和型号 348）里而使有害的碳化铬无从形成，从而可以防止在热影响区里产生敏感性。对于需长时间处于敏感化温度范围内使用的用途也可推荐使用稳定型牌号，例如经受长期的应力消除或在高温中使用。然而，当稳定型牌号的焊接件被加热至敏感度的范围随后再被置于腐蚀性的介质里时，它会遭受严重的局部腐蚀，称之为“刀口侵蚀”。部分稳定的碳化物溶解进入毗邻焊缝的非常窄小的区域里，然而碳化铬会在随后处于敏感性范围的过程中析出。可以在焊接后通过退火或稳定化退火，即使是局部的，也可防止这类不同寻常的敏感性的出现。

焊缝开裂。奥氏体不锈钢极具韧性和塑性，故冷焊开裂决不会成为其问题。然而奥氏体不锈钢从固相线冷却到约 980℃（1800℉）时，它对热开裂或微裂隙都很敏感。在冷却通过上述温度范围的过程中，通过消除或减少在焊缝中所产生的拉应力，可以防止微裂隙的产生或将其降低到最低限度。通过控制残留元素，如磷的浓度可以在一定程度上控制微裂隙的产生。然而最通常的控制方法还是保证在堆积后的焊缝里至少有 3%~4% 的铁素体存在。少量的这种铁素体相似乎能防止在全奥氏体焊缝金属里所常发生的开裂。铁素体的含量通常利用德隆（Delong）图依据成分进行估计，该图是长期以来所用的舍夫勒（Schaeffler）图的改进版；或者可以使用新近由焊接研究委员会为更高合金焊接材料所开发的焊接组分图。德隆的改进在于将有效的氮奥氏体稳定化效应考虑进去。因为以这种方法计算的铁素体含量并不十分精确，故建议对于重要的用途要利用堆积的焊缝金属的磁性分析进行测定铁素体的实际含量。对于焊接生产，在一般使用高铁素体的焊条焊接含铁素体较低的金属的情况下，尤其要采用测量而不是计算的方法。于是，焊缝的成分就随其稀释的程度而改变。

控制铁素体的含量并不总是解决微裂隙的有效措施。铁素体是一种磁性相，它会降低在某些介质中的耐腐蚀性，并且长时间地处于高温用途里会由于 σ 相的析出而导致脆化。焊接后经过退火，可以明显降低焊缝中的铁素体含量（一般2%~4%）；但是对于焊接后无法退火的情况将要求全奥氏体焊接。有些如型号 310 的钢在整个规定成分范围里都是全奥氏体。在全奥氏体不锈钢里，通过低热输入的焊接、尽量减小焊接约束、按低约束条件设计以及保持低浓度的残留元素，均可将焊接开裂降低到最低限度。

铁素体型号的塑性不如奥氏体型号，故它们对开裂更为敏感。某些铁素体不锈钢（例如型号 430）在焊接后的冷却过程中会形成相当数量的马氏体，由此增加冷开裂的敏感性。建议用 150 ~ 230℃（300 ~ 450℉）温度预热，即可使所有的铁素体型号中的焊接开裂减少降低至最低限度。

在全铁素体型号如409、446和26Cr-1Mo里，焊接会造成基体里毗邻焊缝处的晶粒粗大。因而使韧性降低，尤其对于大截面，即使焊接后进行热处理也难以使其得以恢复。在高温下，形成奥氏体的铁素体不锈钢不会有明显的晶粒粗大，但是建议利用焊接后退火促成马氏体转变并增加热影响区的塑性。

马氏体不锈钢对开裂的敏感性甚至比铁素体型号还要大。一般焊接都要求预热到200~300℃(400~600℉)。焊接后的退火是其标准工艺，尤其是$w(C)$大于0.20%的钢。

双相不锈钢会因为焊缝金属和氢裂而受到损伤。但是根据报道，造成损伤仅限于下列工况：合金经受重度的冷变形加工、焊缝金属受到高度的约束或者非常高的铁素体含量结合非常高的氢含量，这是由于涂敷焊条或含氢保护气体的失控所致。

清洗和抛光

对不锈钢零件进行适当清洗和抛光，对于保持不锈钢所规定的耐腐蚀性和外观是必不可少的。对此需要重视的程度取决于应用的需要，最严密的预防措施(如在清洁室内的装配和复杂装配后的清洗)应用于重要的用途里，例如核反应堆芯、药品和食品的加工设备以及航空航天的用途。

第3节 锻压不锈钢的耐腐蚀性

不锈钢的防腐蚀机理不同于碳素钢、合金钢以及大多数其他金属。在上述其他情况里，实际由氧化物形成的保护层将金属与周围气氛分隔开来。由这些氧化物所提供的保护程度取决于氧化物层的厚度、连续性、对金属的粘附和粘着性以及氧和金属在其氧化物中的扩散性。在高温氧化过程中，不锈钢通常使用类似的模式进行腐蚀保护。然而在低温下，不锈钢并不形成真正的氧化物层，而是形成一种钝态膜。现已提出的一种机理认为形成的是水合氧化物，但是关于金属表面的氧化复合物的性质尚未达成共识。然而，氧化膜应当是连续的、无孔隙的、不易溶解的，并且在有氧气存在的情况下如果发生破坏可以自我愈合。

所谓惰性都是存在于特定环境里的确定条件下。惰性得以维持的条件范围取决于严格的环境及不锈钢的族类和成分。当条件有利于惰性的维持时，不锈钢会表现极低的腐蚀速率。如果惰性在惰性膜无法得以修复的条件下遭到破坏，那么不锈钢就会非常像碳素钢和低合金钢一样地发生腐蚀。

氧气的存在对于不锈钢的耐腐蚀性是关键性的。当不锈钢赤裸且其表面不加掩饰地保持在流通、疏松的介质里时，其耐腐蚀性可以达到最大。表面只有部分遮盖——如生物附着、油漆或安装垫片，则会在其附着区下面形成氧变质区。氧变质区相对其有良好通风的充分裸露表面呈现为阳极，并且为了防止发生腐蚀，不锈钢要求有更高的合金含量。

若牌号选择合适，不锈钢将能使用很长时间且只有极少的腐蚀发生。但是选择不当的牌号将会发生腐蚀并穿透，其速度也比碳素钢因均匀腐蚀而造成的失效要快得多。所以正确选择不锈钢牌号，也就是在最低成本的要求与其运行或停机期间因为环境条件变化而造成腐蚀性损坏所冒的风险之间作出的权衡。

关于钝化作用(passivation)一词在其意义上存在着一些含糊。并非必须对不锈钢进行化学处理才能获得钝态保护膜，其保护膜是在氧气存在的条件下自行生成的。最为常见的钝化作用就是去除游离铁、氧化物及其他表面污染物。例如在轧钢厂，不锈钢可以在酸溶液中酸洗，即以常用的硝酸和氢氟酸(HNO_3-HF)的混合液清除在热处理中产生的氧化物。一旦表面得到清洗，就会使其以整体成分裸露于空气中，钝态保护膜即刻生成。

成分的影响

铬。这是形成钝态保护膜的基本元素。在形成和维持保护膜的过程中，其他元素能影响铬的效能，但是其他元素本身并不能为不锈钢形成这种性能。首先观察到的保护膜大约为10.5% Cr(质量分数)，这种成分的膜是相当脆弱的，并且只能提供在缓和气氛中的保护。随着$w(Cr)$增加到17%~20%而成为典型的奥氏体不锈钢，或到26%~29%，则可能属于较新型的铁素体不锈钢，以此大大提高钝态保护膜的稳定性。然而较高的含铬量会对力学性能、加工性、焊接性以及在某种热态中应用的适用性产生负面影响。因此，通过改变其他元素提高耐腐蚀性常常更为有效，而铬倒是可以视情况增加。

镍。足够的含镍量将能使奥氏体组织稳定化，以此大大提高力学性能和加工特性。镍可有效地提高再钝化效应，尤其在还原气氛中。镍对于提高在矿物酸中的耐腐蚀性特别有用。当$w(Ni)$增加到约8%~10%时，将降低其抗应力腐蚀开裂(SCC)的能力，但进一步增加就开始恢复抗SCC的能力。当$w(Ni)$达到约30%时，能在大多数的用途环境中获得抗SCC能力。在较新型的铁素体牌号里，镍的添加量尽管低于稳定铁素体相所需的数量，但还是有相当的效用。在此范围内，镍能提高屈服强度、韧性和耐还原酸的能力，但是它会使铁素体牌号对浓氯化镁($MgCl_2$)溶

液变得敏感。

锰。其中等含量并结合镍的一起加入将有助于许多由于镍而发挥的功效。然而，用锰全部代替镍是不可行的。非常高的含锰钢会产生一些不寻常的和有用的力学性能，如耐擦伤性。锰和硫在不锈钢里的相互作用能生成硫化锰。这些硫化物的形貌和成分会对耐腐蚀性产生相当的效用，特别是耐点蚀性。

钼。与铬的结合对于在有氯化物存在的条件下稳定钝态膜非常有效。钼在提高抗点蚀和裂隙腐蚀的能力方面特别有效。

碳。它对于通过热处理获得的淬硬性有一定程度上的用处，它也是马氏体牌号的基础元素，并为不锈钢提供在高温应用中的强度。碳在所有其他应用中，由于与铬所发生的反应而不利于耐腐蚀性的提高。在铁素体牌号中，碳对于其韧性极为有害。

氮。它有助于奥氏体不锈钢的增强耐点蚀性、延缓铬-钼 σ 相的形成和提高钢的强度。氮在较新型双相钢牌号里对于增加奥氏体的含量、减少铬和钼的偏析以及提高奥氏体相的耐腐蚀性都是不可或缺的。氮对于铁素体牌号的力学性能是非常有害的，故当给钢里加入稳定化元素处理时，必须比照碳进行。

铝。铝的加入能增强耐高温氧化的能力。

铌。用于与碳相结合，减少碳化铬的形成，以此可减少当不锈钢焊接或热处理时，发生晶间腐蚀的可能性。

钛。起到与铌相同的作用。在一些合金里，钛和铌一起使用。

铜。在一些不锈钢中，铜的加入是为了获得对硫酸(H_2SO_4)的耐腐蚀性。

硅。在一些合金里，硅的加入是为了耐高温氧化的能力。硅还能表现出抗 SCC 的能力，还有耐氧化酸腐蚀的能力。

热处理的作用

不适当的热处理会导致不锈钢的显微组织发生劣变。其实大部分的麻烦问题都是碳化物的析出和不同金属间化合物相，如 σ 相、χ 相和 η 相的析出。

敏感化。或称为碳化物，其析出都是发生在当奥氏体不锈钢加热至 425 ~ 870℃ (800 ~ 1600℉) 期间。处于此温度的时间将决定碳化物的析出数量。当碳化铬析出在晶粒的边界上时，其毗邻的区域就会发生铬的损耗。若析出是相对连续的，则上述损耗会使不锈钢对晶间腐蚀产生敏感性，也就是包络在每一个晶粒外面的贫铬表层或包面发生溶蚀。敏感性还会降低耐其他形式腐蚀例如点蚀、裂隙腐蚀及 SCC 的能力。

时间-温度-敏感性曲线可以为防止敏感性提供指导，并且揭示了含碳量对这种现象的影响(见图 2.7-10)。图 2.7-10 中所示的曲线表明 0.062% C 的型号 304 不锈钢必须在 5min 之内冷却至 595℃ (1100℉) 以下，才能避免产生敏感性。但 0.030% C 的型号 304L 需花 20h 冷却到 480℃ (900℉) 以下，才不会成为有敏感性。这些曲线都是作为一般性的指南，在其应用于不同类型的不锈钢以前应当先进行验证。

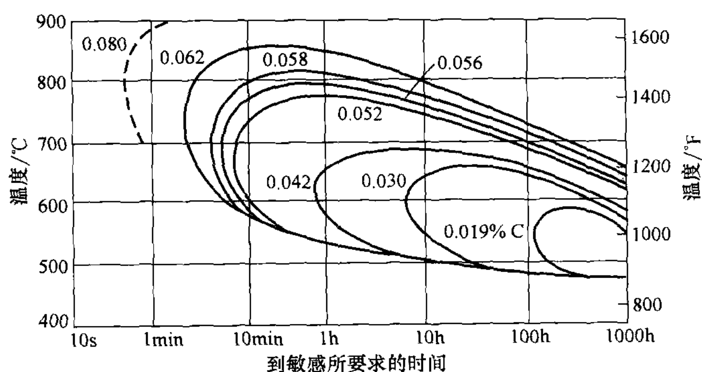


图 2.7-10 型号 304 在 $CuSO_4$ 和 H_2SO_4 在含有游离铜的混合液中的时间-温度-敏感性曲线。曲线所示的是碳化物在不同含碳量的钢中析出所需要的时间。碳化物在不同含碳量曲线及其右面的面积里析出

避免敏感性的另一种方法就是使用稳定化钢。这种不锈钢含有钛和/或铌。这些元素具有与碳的亲和力并容易形成其碳化物，从而使铬即使以极长的时间裸露在敏感化的温度范围里，也还能保留在固溶体里。型号 304L 在相对较短的焊接裸露过程中能够避免敏感性，但是会因长时间的裸露而敏感化。

退火是纠正敏感化不锈钢的仅有办法。因为不同的不锈钢要求不同的温度、时间和淬火规范，用户应向供应商查询这些相关数据。可以通过很多试验测试因碳化物在奥氏体和铁素体不锈钢中析出所造成的敏感性。应用最为广泛的试验，如 ASTM 标准 A 262 和 A 763 所规定的。更为详细的有关不锈钢敏感性的内容可参阅本章第 1 节。

金属间化合物相的析出。σ 相和其他金属间化合物相的析出，也会增加对腐蚀的敏感性。σ 相是一种富铬-钼相，它会使不锈钢对晶间腐蚀、点蚀和裂隙产生敏感。一般来说，它发生在高合金不锈钢(高铬、高钼不锈钢)里。σ 相生成于 540 ~ 900℃ (1000 ~ 1650℉) 之间的温度范围里。就像敏感性，它可以通

过固溶退火进行纠正。有关金属间化合物相在不锈钢里的析出也可参阅本章第1节。

清洗步骤。任何不锈钢的热处理都应该在其之前和之后进行清洗。在热处理之前，钢要进行清洗，以去除在高温处置过程中会镶嵌在表面上的外来杂质。处于表面的含碳材料会引起表面含碳量的增加，并造成碳化物的析出。盐会造成过度的晶间氧化。因此不锈钢必须在热处理之前进行清洗。

除了在热处理过程中使用了惰性气氛以外，处理以后的不锈钢表面都将有氧化膜的包覆。但这种膜并不是非常耐腐蚀，必须将其去除，使不锈钢表面形成一种钝态膜，以此提供设计预期的耐腐蚀性。在热处理的前、后有多种清洗方法。为此，ASTM A380能提供极好的指导。

焊接的影响

在焊接中遇到的一些主要问题与在热处理里碰到的相同。焊接的热量(毗邻焊缝的基体金属的部分可以被加热至430~870℃或800~1600℉)会造成敏感性以及金属间化合物相的形成，由此增加不锈钢焊接件对晶间腐蚀、点蚀、裂隙腐蚀和SCC的敏感性。这种现象常发生在焊缝的热影响区。敏感性和金属间化合物相的析出可以通过焊接后的固溶退火进行纠正，或者可以使用低碳钢或稳定化牌号。

吸入高热量焊缝的另一个问题就是晶粒的生长，特别是在铁素体不锈钢里。过度的晶粒生长会增加对晶间侵蚀的敏感性和降低其韧性。故而，在大部分多数的不锈钢焊接中，最好是尽可能地限制热量的吸入。

清洗步骤。在进行开始任何焊接之前的所有材料、冷铁、夹具、固定杆、工作台、焊条和焊丝以及不锈钢都必须清除所有的外来物质。潮湿会造成焊缝的疏松，并因而降低耐腐蚀性。有机材料如脂、漆和油都会造成碳化物的析出。铜的污染物会造成开裂。其他车间的尘土一般也会造成焊缝的疏松和减弱。

焊接设计和工艺规范。这对于生产完好的耐腐蚀焊接是非常重要的。在焊接中，保持良好的配合和最小的焊接位置偏移将可以使裂隙和夹渣降低到最小。设计不应将焊缝置于关键的流动部位。当要将低合金钢的支撑和梯子安装在不锈钢的液罐外面时，应当使用不锈钢的中间垫块。一般来说，合金含量高于型号316的不锈钢应该使用比基体金属含有更多的铬、镍和钼的焊条金属，还要尽量减少焊接溅射。

焊接之后，应该用钢刷、喷丸、打磨或錾凿将焊接溅渣、焊渣和氧化物全都清除掉。所有的表面修整设备都不得有铁质杂物。建议在机械清理和表面修整后，再继之以化学清洗。这种清洗可以去除在机械清理过程中所有镶嵌在表面的外来颗粒，而不会伤及焊接件。用于这种清洗和除去锈皮的工艺规范可查询ASTM A380。

表面状态的影响

为了保证满意的使用寿命，不锈钢的表面状态必须给予充分的关注。不带有缺陷、瑕疵，以及由锈皮和其他外来杂质留下的残痕的光滑表面可以降低腐蚀的可能性。一般来说，光滑、高度抛光和能反射光的表面具有较高的耐腐蚀性。而粗糙表面更容易吸附灰尘、盐分和潮湿，以此易于引发局部的腐蚀作用。

油和脂可以用碳氢化合物溶剂或碱性清洗剂进行清洗，但在热处理前这些清洗剂必须清除干净。用于去脂的三氯乙烯残留所形成的盐酸(HCl)会造成严重的不锈钢侵蚀。表面污染物也会由切削、剪切和拉深的工序造成。刀具上的细小颗粒能印嵌在钢的表面上，除非予以去除，否则都会造成局部的电蚀。这些颗粒最好用“钝化技术”一节里介绍的钝化处理予以清除。

应该避免使用喷丸或喷砂处理，除非使用的是非铁的二氧化硅；而喷丸金属尤其会污染不锈钢表面。如果金属碎砾的喷丸清理或喷丸强化在所难免，那么在其处理之后的零件必须通过浸没于硝酸(HNO_3)进行清洗。

钝化技术。在处置和加工如切削、成形加工、滚动清理、研磨的过程中，铁、工具钢或车间尘土的颗粒都会镶嵌或涂抹在不锈钢零件的表面。这些杂物会降低天然氧化物(钝态)膜的有效性，而这种氧化物膜是在处于低温氧气中的不锈钢表面上生成的(参见本节的引言段)。如果让那些颗粒留在那里，那么它们就会引起腐蚀，并在不锈钢表面产生锈蚀样的斑点。为了防止出现这些情况，半成品或成品零件需经过钝化处理。这种处理包括清洗，然后再浸没在HNO_3或HNO_3加上氧化盐的溶液里。经处理，能溶解这些镶嵌或涂抹的铁质颗粒，恢复原先的耐腐蚀表面，使不锈钢所固有的耐腐蚀性达到最大。如表2.7-12所示，酸浴的成分取决于不锈钢的牌号。300系列的不锈钢可以在20%(按体积)的HNO_3中进行钝化。加入重铬酸钠($Na_2Cr_2O_7 \cdot H_2O$)或增加HNO_3的浓度，都可用于耐腐蚀性较差的不锈钢，用于降低其闪蚀电位。

表 2.7-12 不锈钢的钝化溶液

牌 号	钝化处理
奥氏体 300 系列或≥17% Cr 的牌号(440 系列除外)	20%(体积分数)HNO_3、温度 50~60℃(120~140℉)处理 30min
单一铬的牌号(w(Cr)为 12%~14%)、高碳/高铬牌号(440 系列)或析出硬化牌号	20%(体积分数)HNO_3加 22g/L(3oz/gal)的 $Na_2Cr_2O_7 \cdot H_2O$、温度 50~60℃(120~140℉)处理 30min，或 50%(体积分数)HNO_3、温度 50~60℃(120~140℉)处理 30min

注：易切削牌号要求用特殊的碱-酸-碱的钝化处理。

不锈钢的腐蚀形式

一般(均匀)性腐蚀。不锈钢的这种腐蚀被认为是环境具有一种将不锈钢表面上的钝态膜进行剥离，并妨碍其表面再次钝化的能力，其发生说明是牌号选择的失误。它的一个例子就是一种较低铬的铁素体不锈钢被置于中等浓度的热硫酸(H_2SO_4)里。

电蚀。它发生于两种不同金属在一种腐蚀介质里的电接触。不锈钢作为一种高耐腐蚀的金属在与一种较少惰性的金属如钢相接触时，可以起到阴极的作用。如不锈钢构件中的钢螺栓所发生的一类钢零件的腐蚀一直是受人重视的问题。然而可以将其作为在较大型的钢结构中为保护关键不锈钢构件的一种有利方式而加以利用。在将不锈钢连接到更为惰性的金属上的情形里，必须重视不锈钢的激活钝化条件。如果不锈钢在某环境里表现为钝态，则它与更为惰性的金属之间的电交互作用也未必能产生显著的腐蚀。如果不锈钢具有活性或只是有一点钝态，则它与更为惰性的金属之间的电交互作用很可能使不锈钢产生持续的快速腐蚀，而不会发生再钝化作用。不锈钢的电交互作用的最重要方面就是有必要相对于本体材料选择具有适合耐腐蚀性的紧固件和焊接件，其本体材料应该有大得多的裸露面积。

点蚀。这是一种能使不锈钢产生穿透性的局部侵蚀，而几乎不会造成总体结构在重量上的损耗。点蚀与钝态膜的局部性突变有关系。它可以是一种机械缺陷，如夹杂物或表面损伤；也可以是膜的局部化学损坏。氯化物是最普通的点蚀触发剂。实际上，一旦形成点蚀，它就变成裂隙，其局部化学介质比整体介质更具有侵蚀性。这就解释了为何不锈钢表面上非常高速的流体有可能减少点蚀，高速流体能防止腐蚀性物质在其蚀坑里的集中。针对抗点蚀所生成的钝态膜的稳定性主要受控于铬和钼。微量合金元素也能通过影响钢内的夹杂物(如硫化物)的数量和种类发挥其重要作用，因为这些夹杂物会起到点蚀源的作用。

点蚀的触发受表面状况包括所存在的沉积物的影响，还受温度的影响。在特定的环境里的一种牌号不锈钢是以单一温度或非常窄的温度范围为其特征的，超过它就会开始发生点蚀，而低于它将不会。所以有可能选择一种牌号，只要使化学介质和温度不超过其临界范围就不会发生腐蚀。如果运行的条件范围能精确地界定，就有可能进行有效的实验室评价。在使用过程中，沉积物的形成也能降低点蚀的发生温度。图 2.7-11 对各种商用不锈钢的相对耐腐蚀能力进行了比较。

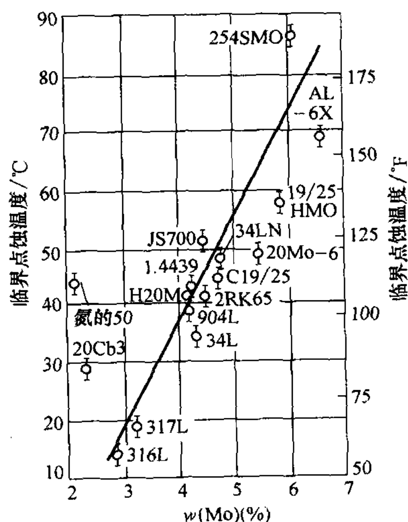


图 2.7-11 含钼量对商用不锈钢的三氯化铁($FeCl_3$)的临界点蚀温度的影响。较强耐蚀性的钢有较高的临界点蚀温度

虽然已知氯化物是发生点蚀的主要触发剂，但还是没有可能为每一种牌号设定单一临界氯化物的极限值。特定浓度氯化物的腐蚀性要受到是否还存在着能加速或抑制腐蚀发生的其他各种化学物质的深刻影响。氯化物的浓度能增加发生蒸发和沉积的地方。由于发生点蚀的特性——快速穿透并反映不出总体上的重量损耗，在实际应用中很少有任何明确的点蚀允许

量值。

裂隙腐蚀。可以将其看成是点蚀的一种严重形式。任何裂隙，无论是由于金属对金属的连接、衬垫、积垢或沉积的何种原因所致，似乎都仅限于氧气的进入并造成侵蚀。在实际中，防止一切裂隙的发生是极为困难的，但是还要尽力而为的。具有较高铬含量的，尤其是较高铬-钼含量的牌号能更耐裂隙腐蚀。正如对特定的环境有一临界的点蚀温度一样，也存在着临界裂隙温度(CCT)。就每一种牌号的不锈钢而言，这个温度相对裂隙的几何形状和性质以及相对所确定的腐蚀介质都是特定的。CCT可以用于为特定的用途选择适合其耐腐蚀的牌号。表2.7-13所示是双相和奥氏体牌号钢的CCT比较。耐腐蚀性较高的牌号也就有较高的CCT。

表2.7-13　双相和奥氏体不锈钢的临界裂隙温度比较

UNS编号	合金名称	CCT在10% $FeCl_3\cdot6H_2O$、pH=1中暴露24h	
		℃	℉
双相牌号			
S32900	型号329	5	41
S31200	44LN	5	41
S31260	DP-3	10	50
S32950	7-Mo PLUS	15	60
S31803	2205	17.5	63.5
S32250	Ferralium 255	22.5	72.5
奥氏体牌号			
S30400	型号304	< -2.5	<27.5
S31600	型号316	-2.5	27.5
S31703	型号317L	0	32
N08020	20Cb-3	0	32
N08366	AL-6N	17.5	63.5
N08367	AL-6XN	32.5	90.5

晶间腐蚀。这是不锈钢在晶粒边界上最容易发生的侵蚀。一般它是由敏感性造成的。这种情况发生在热循环导致碳化物、氮化物或金属间化合物相在晶粒边界上的析出的时候，而且又没有足够的时间使铬扩散填充局部空缺区。晶界析出物并不是侵蚀点，真正对侵蚀敏感的地方正是在毗邻析出物的贫铬区。

除非某一种型号钢应用于能侵蚀其敏感化部位的介质里，否则敏感化并不一定有害处。例如敏感化的钢也可以在不锈钢的高温用途中使用，但是必须对在停机期间由于冷凝所产生的腐蚀性介质而有可能发生的晶间腐蚀给予关注。由于铬能提供耐腐蚀性，所以敏感化也会增加其贫铬区对于其他腐蚀形式如点蚀、裂隙腐蚀和SCC的敏感性。使钢敏感化的热照射可以相对短促如焊接，也可以非常长如在高温中的使用。

应力腐蚀开裂。这是一种由敏感合金、持续拉应力以及特别是与其环境相结合并导致材料的开裂的腐蚀机理。不锈钢对于在氯化物的介质中的SCC特别敏感，温度和存在的氧气可能使不锈钢的氯化物SCC更加恶化。大部分的铁素体和双相不锈钢都不会发生SCC，或都有高耐SCC性。所有的奥氏体牌号尤其是AISI型号304和316都有一定程度上的敏感性。高合金奥氏体牌号具有对氯化钠(NaCl)溶液的耐腐蚀性，但它们易于在$MgCl_2$的溶液中开裂。虽然一些局部的点蚀或裂隙腐蚀可能会先于SCC发生，但是点蚀和裂隙的量非常小，以致难以检测到。应力腐蚀在其发展过程中甚至到了蔓延的地步都难以进行检测，因而会造成压力设备的快速突发性失效。

减缓导致SCC的环境条件是很困难的。产生应力腐蚀所需要的氯化物含量是非常低的。运行过程中，在耐热表面上的表面膜会发生蒸发浓缩或浓缩。像在换热器里一样，温度常是一个过程参数。而拉应力是一个可以控制的参数。然而与加工、焊接或热循环有关的残余应力，而不是设计应力，常是造成SCC的主要原因；甚至消除应力的热处理也不能完全去除残余应力。

冲蚀腐蚀。如果氧化物保护层受到磨料作用而损耗，那么对金属或合金的腐蚀就会加速进行。当氧化层的厚度对于确定耐腐蚀性是一个重要参数时，这种侵蚀的形式就尤为明显。对于不锈钢，钝态膜的冲蚀会导致侵蚀的加速进行。

氧化。不锈钢由于其高铬含量而非常耐氧化。为高温用途选择不锈钢的重要因素是，其牌号钢在热态中的成分和显微组织的稳定性，以及在热循环中氧化皮的粘附性。由于用于高温中的许多不锈钢都是具有较高含镍量的奥氏体牌号，所以有必要对可能发生的硫化侵蚀保持警惕。

特定介质中的腐蚀

为特定介质选择适用的不锈钢需要考虑几个关键因素。首先是耐腐蚀性。各种合金都具有在温和介质(如型号430)或许多种食品处理介质(如型号304不锈钢)中的耐腐蚀性。化学制剂和更为严重的腐蚀剂，则要求使用型号316或更高的合金材料如20Cb-3。影

响介质腐蚀性的因素包括化学物质的浓度、pH、通气性、流体的流动速率(速度)、不纯度(如氯化物)和温度，还包括热传递的影响。

第二关键因素是力学性能或强度。高强度材料往往要牺牲某种形式的耐腐蚀性，尤其是SCC。

第三，必须考虑到加工，包括钢被进行切削、焊接或成形的能力的一些因素。还必须考虑到被加工件适应介质的能力——例如防止材料在裂隙中遭受侵蚀的能力，而这种裂隙在设计中在所难免。

第四，还要估算总的成本，包括原始合金价格、安装成本、成品的有效期望寿命。最后，还要考虑到产品的实用性。

大气腐蚀

造成结构不锈钢生锈最为常见的大气污染物是氯化物和金属铁末。氯化物污染物来源于用于制造混凝土的氯化钙($CaCl_2$)，或者来源于海水中或工业现场的裸露。铁质污染会在构件的加工或装配过程中产生。若可能的话，应将污染减少到最低限度。

暴露在不同大气中的腐蚀性会有很大的差异，并且由此决定不同牌号不锈钢的用途。乡村的大气未受工业化烟雾和海边盐分的污染，对不锈钢的腐蚀性极其轻微，甚至在高湿度区都不例外。而工业化和海洋环境可谓严重得多。

大部分牌号的不锈钢都能适用于工业化大气，虽然较低的含铬牌号并不适用于较为严重污染的大气中。其应用往往取决于外观要求，较低的含铬牌号能满足使用要求但会严重失去光泽。如果外观是很重要的话那么型号430是其能够使用的最低合金牌号，通常要求使用较高的合金牌号。

在无氯化物污染的大气中，不锈钢具有极佳的耐腐蚀性。型号430、302、304和316一般不会显示均匀的外表锈蚀。在一些海洋大气或工业化的环境里会发生锈蚀，即表面为氯化物盐类所污染。被遮蔽的表面由于不能被雨水很好地清洗，而很可能发生严重的锈蚀。

虽然海洋环境会是很严酷的但是不锈钢通常还是能够提供很好的耐腐蚀性。表2.7-14对几种AISI300系列不锈钢在库尔海滩(Kure Beach NC)离海边250m(800ft)远的海洋性大气中经历15年的暴露后所进行的比较，含有钼的材料仅仅有非常轻微的锈迹，所有的牌号经清洗后仍能显示光亮的表面。型号304不锈钢能在许多海洋用途里，表现出令人满意的耐腐蚀性，但是当因受到遮蔽而不能被雨水冲洗和定期清洗时，还是要选用较高合金的牌号。

表2.7-14　在海洋大气中的AISI300系列的腐蚀

AISI型号	蚀点的平均深度		外　观
	mm	mil	
301	0.04	1.6	20%表面有轻度锈蚀和锈痕
302	0.03	1.2	10%表面有锈痕斑点
304	0.028	1.1	15%表面有轻度锈痕斑点
321	0.067	2.6	15%表面有轻度锈痕斑点
347	0.086	3.4	20%表面有中度锈痕斑点
316	0.025	1.0	15%表面有特轻锈痕
317	0.028	1.1	20%表面有特轻锈痕
308	0.04	1.6	25%表面有锈痕斑点
309	0.028	1.1	25%表面有轻度锈痕斑点
310	0.01	0.4	20%表面有轻度锈痕斑点

注：根据在库尔海滩(Kure Beach NC.)离海边250m(800ft)远的海洋性大气中历经15年的暴露。所有试验试件的平均腐蚀率为<0.025μm/a(0.001mil/a)。全部锈痕都容易擦去，并使表面光亮。

型号302和304不锈钢已经成功地应用于许多建筑用途。型号430不锈钢应用于许多地方，但还是存在着一些问题。例如，型号430不锈钢仅在工业化的环境里待了几个月的时间，其受遮蔽的地方就发生了锈蚀。用型号302代替型号430就能得到满意的使用。型号316不锈钢在更具侵蚀性的环境里，例如海洋或严重污染的大气中特别有用。

当奥氏体或铁素体不锈钢在大气中暴露使用时，一般并不担心应力腐蚀开裂。有好几种奥氏体不锈钢曾暴露在库尔海滩(Kure Beach NC)的海洋性大气中。经退火并具有四分之一硬度的锻压AISI型号201、301、302和316不锈钢，对于SCC并不敏感。在焊接后的状态里，只有型号301遭失效。在650℃(1200℉)敏感化1.5h和炉冷之后只有w(C)为0.043%或以上的材料会发生失效。当将淬火硬化马氏体不锈钢或析出硬化牌号应用于海洋环境或存在着氯化物的工业化区域里时，必须考虑应力腐蚀开裂。

在选用高强度不锈钢应用于紧固件的时候，要特别关注其耐SCC性。高强度紧固件很可能发生开裂，并常常是由于腐蚀或者与不太惰性的材料如铝相接触产生氢而造成的。通过优化，热处理能够提高耐SCC性。

暴露于大气中的紧固件可以采用很大不同范围里的合金制造。当在较低强度的材料里要求具有中等程度的耐腐蚀性时，可以采用型号430和未经硬化的型号410不锈钢。当允许使用较低强度时，可以采用优

于平均耐腐蚀性的型号 305 和 Costom Flo 302HQ(含有 ~3.5% Cu 的 S30430)的不锈钢。

水中的腐蚀

水可以有从极其纯净水、化学处理水到高浓度的氯化物溶液的不同种类，如弱碱水或海水，并通过循环进一步浓缩。这种氯化物的含量具有造成不锈钢的点蚀和裂隙侵蚀的危害性。当用途涉及中度的温度升高，甚至低至45℃(110℉)，尤其当热量传递到含氯化物的介质里时，就有发生 SCC 的可能性。为方便起见，将水分成两种一般性的氯化物含量的水来考虑，即：淡水，含有最高大约 600ppm 的氯化物；海水，包括弱碱和严重污染的水。特定氯化物含量的腐蚀性会受到其所含的其他化学组分的强烈影响，以此使水增加或减少其腐蚀性。

淡水中。型号 304 不锈钢能作为像阀件、溢水口、紧固件和泵轴的一些零件，并性能优异地应用于水中和污水处理厂里。Custom 450 不锈钢可作为大型蝶阀的轴用于饮用水里。析出硬化不锈钢所具有较高的强度可以使其轴径减小，从而使流量增加。型号 201 不锈钢可以用作护岸垫板用于减少在淡水中的岸边腐蚀。型号 316 不锈钢在第三级污水处理中被用于微孔过滤网的网丝，并建议将其用于含有微量氯化物的水中。

海水中。海水对于许多材料都是极具腐蚀性的介质。不锈钢在低速海水中或在由于设备的设计不当和粘附生物所造成的裂隙中较可能受到侵蚀。如果海水流速降低到约 1.5m/s(5ft/s)以下，型号 304 和 316 不锈钢就会因为污秽有机物造成的裂隙而遭受深度点蚀。

选择在海水中使用的不锈钢取决于能否将这种滞流状态降到最低限度或将其消除。例如，用 17Cr-4Ni 不锈钢制造的船用传动轴应用于拖网渔船，将不会有滞流暴露及与之有关的点蚀问题。当远洋轮船预计要长期的停航时，就要考虑用更具耐腐蚀能力的船用传动轴材料，如 22Cr-13Ni-5Mn 不锈钢。18Cr-2Ni-12Mn 和高氮型号 304(型号 304HN)不锈钢可用于具有中等耐腐蚀能力的船用轴。

在海水试验项目里，常要利用最为严酷的暴露条件。作为此类数据的实例，将 11 种经过多次精轧的工业用合金平轧试件暴露于海水中(表 2.7-15)。试样按一式三件制备成塑性多裂隙垫圈，每一件上都有 20 个折台或裂隙。将这些垫圈以 2.8 或 8.5N · m(25 或 75lbf · in)的扭矩固定在每一个平板的两侧。将这些平板置于经过滤的海水中长达 90 天，海水以低于 0.1m/s(<0.33ft/s)的速度流动。

表 2.7-15 在经过滤的海水中试验的几种合金的裂隙腐蚀

合金	UNS 代号	遭受侵蚀侧面的数量 S[①]	最大蚀点深度 D		裂隙腐蚀指数 CCI (S×D)
			mm	mil	
AL-29-4C	S44735	0	无	无	0
MONIT	S44635	3	0.01	0.4	0.03
Ferralium 255	S32550	1	0.09	3.5	0.09
合金 904L	N08904	3	0.37	14.6	1.1[②]
254SMO	S31254	6	0.19	7.5	1.1
Sea-Cure	S44660	14	0.11	4.3	1.5
AL-6X	N08366	8	0.34	13.4	2.7
JS777	—	6	2.3	90.6	14[②]
JS700	N08700	14	1.8	70.9	24
AISI 型号 329	—	17	1.6	63	28[③]
Nitronic 50	S20910	17	1.2	47.2	20

注：精轧平板放置在 30℃(85℉)、流速 <0.1m/s(<0.33ft/s)的海水里各 30 天、60 天和 90 天。裂隙垫圈以 2.8 或8.5N · m(25 或 7lbf · in)紧固在上面。

①侧面的总数为 18。 ②所示的穿透侵蚀垂直于上侧面或在侧面上侵蚀。 ③从两侧因侵蚀而穿孔。

表 2.7-14 所列的结果为遭受裂隙侵蚀的侧面数量和该合金的任何裂隙上的最大侵蚀深度。裂隙腐蚀指数(CCI)通过最大侵蚀深度乘以遭侵蚀的侧面数量的计算得到。由此得出表示侵蚀的起始和发展的排行系统。CCI 值较低意味着耐腐蚀性的提高。

前面所述试验中的侵蚀并不说明 CCI 高的材料不能应用于海水里。例如，CCI 值为 20 的 22Cr-13Ni-5Mn 不锈钢原来是一种高度耐腐蚀性的船用传动轴合金钢。在这些试验中，一些较高耐腐蚀性的材料已经应用于通用的冷凝器管道上。这类合金包括 MONIT、AL-29-4C、254SMO、Ser-Cure 和 AL-6XN。

如果不锈钢用于在海水里与其他金属接触，则必须考虑到发生电蚀的可能性。最好只用一些相对电极电位很接近的材料组合在一起，以此能避免较为活泼的材料被侵蚀。在海水的不锈钢阴极保护就是利用电位差的优点。阴极保护可以用来保护奥氏体型号 302 和 316 不锈钢免受裂隙腐蚀和点蚀，但是型号 410 和 430 不锈钢在低于作为完全保护所要求的电流密度时，就会产生氢气泡。

在海水中，应用不锈钢应当指出的其他因素包括高速流动、通气性和温度的影响。不锈钢一般对海水

的高速流动、浸蚀和气蚀表现出极佳的耐腐蚀性。还有，不锈钢在通气的海水里有最佳的使用性能，故由于在特定地方缺少通气往往会导致裂隙侵蚀。为了在不锈钢的清洁表面保持钝态膜，则仅需要非常少的氧气。从其周围温度提高到约50℃（120℉）常能减少对不锈钢的侵蚀，这很可能是因为其氧气溶解量的不同、表面膜的变化或试件的主暴露区电阻的变化。但是温度的进一步提高会造成腐蚀如SCC的增加。

化学介质的选择要素

选择用于化学物质里的不锈钢要求考虑所有各种形式的腐蚀，以及杂质含量和通风程度。如果一种具有足够的耐一般性腐蚀的合金被选中，则必须确保不会因氯化物的污染导致点蚀或SCC而使这种材料失效。通风性可以是腐蚀的一种重要因素，特别在其钝性模棱两可的情况下。如果发生不同金属的接触或杂散电流，则必须考虑到电蚀或氢脆的可能性。

合金的选择还取决于制造和使用中的一些细节。如果材料是在焊接后或应力消除后使用，则在这些热态处理后的使用中必须能够耐晶界侵蚀。在氯化物的介质里，当由于设备设计的不当或粘附积垢的形成而有裂隙存在时，必须考虑到裂隙腐蚀的可能性。较高的流速能防止积垢的形成，可是在极端情况下它会因为冲蚀或气蚀而造成加速侵蚀。使用温度的升高一般会增加腐蚀。在热传导的应用中，较高的金属壁温度会使整体温度较低的溶液形成比预期更高的流速。

据此，可以对不同类别的不锈钢在特定化学介质中的性能进行一些归纳。这些测试结果与牌号的成分有关。例如与铁素体的耐腐蚀性相比，某些奥氏体牌号中镍和铜的存在能大大增强其在H_2SO_4中的耐腐蚀性。然而在实际中，遇到的化学物质组合所具有的耐腐蚀性比其中单个组分所预期的腐蚀性要更大或更小一些。在真实或模拟环境里的试验总是被推荐为选择一种不锈钢牌号的最佳方法。还可以从合金供应商那里获取一些有关其实际使用的补充资料。

无机酸里的腐蚀

不锈钢的耐酸性取决于氢离子（H^+）浓度和酸的氧化能力，这些材料的变量（如铬、镍和碳的含量），以及热处理。例如退火不锈钢能耐强HNO_3，尽管HNO_3是低pH的酸，但因为它具有强氧化性，且由于合金里的铬含量，故能形成钝态膜。相反，不锈钢能被强HCl快速侵蚀，就是因为不太容易形成钝态膜。即使在强HNO_3中，如果不锈钢中有足够的含碳量并且被敏感化，就也会快速侵蚀。氧化剂如铁盐会在某些酸中造成降低其一般性腐蚀，但倘若有氯离子（Cl^-）的存在，就会加速点蚀侵蚀。

硝酸。如前所述，不锈钢主要因其含铬量而在HNO_3中广泛应用。大部分退火状态的AISI300系列不锈钢在其酸的浓度为0～65%、温度至沸点的条件下都具有良好或极佳的耐腐蚀性。图2.7-12所示就是型号304不锈钢的良好耐腐蚀性，尤其当与低含铬量的型号410不锈钢相比。在高温更为严酷的环境中将要求合金有更高的含铬量。像7-Mo PLUS（UNS S32950）和2RE10（UNS S31008）都可推荐在HNO_3冷却剂-制冷机里使用。

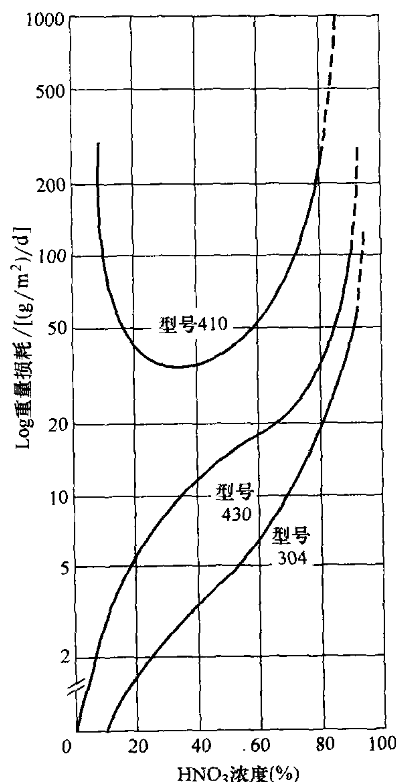


图2.7-12 不同的不锈钢在沸腾HNO_3里的腐蚀速度

硫酸。不锈钢处于活性和钝性的分界线上。传统的铁素体牌号如型号430只能有限地在H_2SO_4中使用，但是含有铬和钼（如28% Cr和4% Mo）的较为新型的铁素体牌号加上至少0.25% Ni就能在沸腾的10% H_2SO_4中表现出良好的耐腐蚀性，然而随酸浓度的提高，腐蚀就会加快。

传统的奥氏体牌号在稍高温度的非常稀或高浓度H_2SO_4里，都能表现出良好的耐腐蚀性。中等浓度的酸具有较大的腐蚀性，故对此传统牌号的使用也非常有限。图2.7-13所示是几种不锈钢在高至大约50%

的 H_2SO_4 里的耐腐蚀性。通风性和氧化剂的添加将可以显著降低不锈钢在 H_2SO_4 里的侵蚀。这是因为较为氧化的环境能更好地保持富铬的氧化物钝态膜。

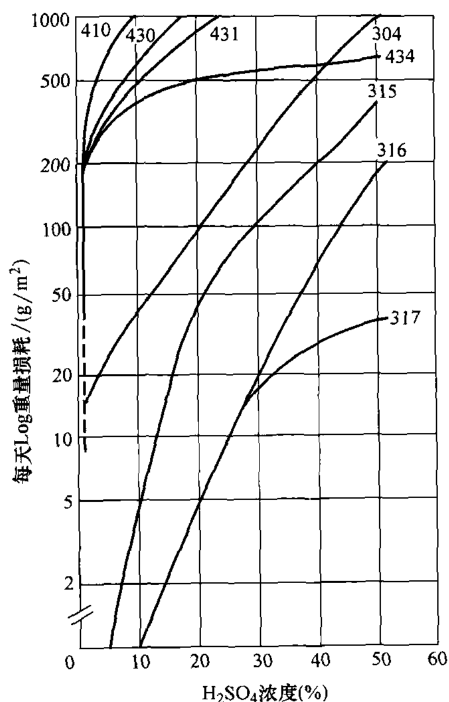


图 2.7-13　不同不锈钢在不通风的 20℃(70℉)中的腐蚀速度

使用高镍和铜含量的奥氏体牌号，如 20Cb-3 不锈钢可以使之在 H_2SO_4 中的耐腐蚀性得以提高。除了减少一般性的腐蚀之外，增加镍的含量还可提高耐 SCC 的能力。由于具有这种耐腐蚀的能力，20Cb-3 不锈钢可作为阀用弹簧在 H_2SO_4 里应用。

磷酸。传统只含铬的不锈钢在磷酸(H_3PO_4)里具有非常有限的耐一般性腐蚀的能力并且只有在非常稀或比较高的浓度里才具有较低的腐蚀速度。传统的奥氏体不锈钢能在其全部浓度范围里并在高至 65℃(150℉)的温度下具有有效的耐一般性腐蚀的能力；对于其酸的浓度高至大约 40% 并温度达到沸点的应用也是可能的。

然而在工业应用中，由 H_3PO_4 引发的潮湿环境包括由磷灰岩产生的一些杂质如氯化物、氟化物和 H_2SO_4。这三种杂质会在卤族元素存在的情况下加速腐蚀，特别是点蚀和裂隙腐蚀的发生。为防止由 H_3PO_4 引发的潮湿，要求使用比传统奥氏体不锈钢有更高合金含量的材料。可选用的材料包括合金 904L、合金 28、20Cb-3、20Mo-4 和 20Mo-6 不锈钢。

盐酸。不锈钢一般不用于 HCl 的用途，除非有可能用于室温下非常稀的情况里。不锈钢会在盐酸介质里产生严重的一般性腐蚀、SCC 和点蚀产生敏感性。

亚硫酸。虽然亚硫酸(H_2SO_3)是一种还原剂，但多种不锈钢都能在的 H_2SO_3 介质中得到满意的使用。传统的奥氏体不锈钢可应用于亚硫酸盐的蒸煮器，而在二氧化硫(SO_2)和 H_2SO_3 的介质中常见型号 316、型号 317 和 20Cb-3 的使用。通过消除裂隙包括由悬浮固体颗粒沉降而形成的裂隙、或者通过使用含钼牌号，提高使用寿命。在某些介质中，也有发生 SCC 的可能性。

氢氟酸。只有奥氏体不锈钢被推荐用于氢氟酸(HF)中，这些材料甚至对稀 HF 的耐腐蚀性也很有限。型号 304 对于任何有效浓度的耐腐蚀性都很差，但是型号 316 对室温里和低于 10% 的浓度都具有有效的耐腐蚀性。冷变形加工材料——如作为紧固件材料使用的型号 303——会在 HF 工厂里迅速失效。退火的奥氏体不锈钢在 HF 介质中对 SCC 有敏感性。较高的合金，如 20Cb-3 在室温里对所有的 HF 浓度以及在 70℃(160℉)温度里，对其 0～10% 的浓度均有良好的耐腐蚀性。

在有机酸和化合物里的腐蚀

一般来说，有机酸和化合物的侵蚀性不如无机酸那么大，因为它们不会完全离子化，但是它们能腐蚀不锈钢，尤其当有杂质存在时。当没有氯化物而有氧化剂存在时，可以降低腐蚀的速度。

乙酸。表 2.7-16 所示是几种不锈钢在乙酸中的腐蚀速度。将型号 304 和 316L 不锈钢置于乙酸的整个浓度范围里和直到沸点的温度，由此可获得对纯乙酸的耐腐蚀性。可以考虑将型号 304 不锈钢用于低于大约 90% 的所有浓度和温度高达沸点的乙酸里。在乙酸制备过程中，所遗留的杂质如乙醛、甲酸、氯化物和丙酸估计都会增加对不锈钢的侵蚀。氯化物能造成点蚀或 SCC。

表 2.7-16　奥氏体不锈钢在沸腾冰乙酸中的腐蚀

AISI 型号	腐蚀速度	
	mm/a	mil/a
304	0.46	18
321	1.19	47
347	1.04	41
308	1.35	53
310	0.99	39
316	0.015	0.6

数据取自 11、12 和 21 天的现场试验结果的平均值。

甲酸。这是腐蚀性较强的有机酸之一，其在凝固蒸汽中的腐蚀速度比在液体里更快。型号 304 不锈钢能用于中等温度。然而型号 316 不锈钢或更高的合金如 20Cb-3 常被优先选用，并且含(质量分数)有 26% Cr 和 1% Mo 或 29% Cr 和 4% Mo 的高合金铁素体不锈钢也有希望选用。

其他有机酸。在一定的温度下，丙酸和丙烯酸的腐蚀性一般与乙酸相似。杂质是很重要的，它能严重影响腐蚀的速度。型号 304 不锈钢可用于中等温度的柠檬酸和酒石酸里，型号 316 建议用于所有的浓度和直到沸点的温度。

有机卤化物。大部分干的有机卤化物都不对不锈钢造成侵蚀，但是若有水的存在，则会促使有机卤化酸的形成并造成点蚀和 SCC。因此，在有机卤化物中使用不锈钢，应该注意保证排除水的进入。

其他有机化合物。型号 304 一般都能满意地应用于较低温度下的各种醛和乙酸纤维素中，以及在高至约 150℃(300℉)的脂肪酸中。在更高的温度里，这些化学物质要求使用型号 316 或 317。型号 316 不锈钢还能用于各种胺、邻苯二(甲)酸酐、焦油(沥青)和尿素的用途。

不锈钢已应用于塑料和合成纤维工业里。型号 420 和 440C 不锈钢已作为塑料注模钢得到应用。更多的耐腐蚀材料，如 Custom450 可用于挤压聚氯乙烯(PVC)管子。用 Custom450 和 Custom455 不锈钢制造的人造纤维喷丝头、包装零件和计量泵已经应用于合成纤维工业，生产尼龙、人造纤维和聚酯纤维。

在食品和饮料中的腐蚀

不锈钢在食品和饮料工业中使用的可行性，是因为它不会产生腐蚀生成物来污染其工艺环境，和不锈钢的超级可清洁性。腐蚀性介质往往会在其处理面边沿上多少留下一些高浓缩的氯化物，常还要与经过相当浓缩的有机酸混合。作为水的变化范围可以从蒸汽加热直到盐水冷却。纯洁度和卫生标准要求其具有最佳的耐点蚀和裂隙腐蚀的能力。

像蔬菜一类的食物代表较为缓和的介质，一般可以用型号 304 不锈钢处置。然而一些调味品和清洗液有较强的侵蚀性，甚至能使型号 316 不锈钢发生点蚀。为提高耐点蚀性应该考虑使用像 22Cr-13Ni-5Mn、904L、20Mo-4、254SMO、Al-6XN 和 MONIT 的一些不锈钢。

在高温度下，若有氯化物存在则必须选择能耐点蚀和 SCC 的材料。在像烹饪用的蒸汽夹套或处理容器的一些热传导的应用里，或者在换热器里必须防止发生应力腐蚀。在处理或盛水的面上会发生开裂，或者开裂起始于含有氯化物的保温层下面的组件外表面上。奥氏体不锈钢在啤酒厂的应用除了几种会在高温水管中发生 SCC 的情况以外，一般都是很成功的。铁素体不锈钢或双相不锈钢是对付 SCC 的合适材料。

不锈钢的设备应当经常清洁以延长其使用寿命。设备应用清水冲洗，尼龙刷和洗洁精洗刷，然后再进行冲淋。另一方面，在一些商用洗碗机的化学消毒过程中，应当考虑到一些非常具有侵蚀性的清洗方法对不锈钢所造成的影响。在某些情形里有必要选用更高合金的不锈钢牌号，用于解决一些主要暴露在强侵蚀介质里的问题。

常用的 AISI 牌号可以为许多的食品和饮料用途提供满意的应用。型号 304 不锈钢广泛地应用于乳制品工业，型号 316 可用于饮料行业里的管道、管件。这些牌号以及型号 444 和 Custom450 不锈钢都能在这些处理设备中用于食品的输送链。饮料的配料设备中的切削加工零件都是用型号 304、304L、316、316L 和 303Al MODIFIED、302HQ-FM 以及 303BV 不锈钢制造的。当使用易切削牌号时，重要的是在使用前要对其进行适当的钝化和漂洗，以此优化其耐腐蚀性。

食品设备设计时，不应留下会让食物填入的缝隙。对于大部分腐蚀性食物产品，只要可能就应该使用特别低碳的不锈钢。当设备最后用 2B(一般用途的冷轧)而不是 No.4(一般用途的抛光)表面粗糙度的不锈钢薄板制成时，(2B 和 No.4 是美国在不锈钢薄板行业中通行的一种与其产品制造工艺有关的粗糙度级别;前者是冷轧后经表皮光轧,后者是冷轧后用一定粒度的砂带抛光所得到的粗糙度,后者甚至还用砂带的沙粒粒度来表示用以抛光后的薄板粗糙度。——译者注)其效果能得以改善。另外，也可考虑用电抛光表面。

在碱中的腐蚀

所有的不锈钢都能在温度高至 65℃(150℉)的各种浓度氢氧化钠(NaOH)中耐一般性腐蚀。型号 304 和 316 不锈钢在沸腾且直至 20% 浓度的 NaOH 里都表现为低速的一般性腐蚀。这些牌号的应力腐蚀开裂能发生在约 100℃(212℉)的温度里。E-Brite 和 7-Mo 不锈钢具有在 135℃(275℉)和 50% NaOH 中的耐一般性腐蚀和 SCC。不锈钢在所有各种浓度的氨(NH_3)和氢氧化铵(NH_4OH)中且温度高至沸点时，都能表现为良好的耐腐蚀性。

在盐中的腐蚀

不锈钢对于大部分的中性或碱性的非卤化物盐类都有很高的耐腐蚀性。在一些情形里，型号 316 尤其

能耐点蚀，但即使是有较高钼含量的型号317也容易受硫化钠(Na_2S)溶液的侵蚀。

氢卤盐类。因为卤素离子具有穿透钝态膜的能力并造成点蚀，故对不锈钢有较大的腐蚀性。在通风和缓和酸性的氧化溶液里会加剧点蚀的进行。氯化物造成点蚀的能力一般要超过其他卤化物。

气体中的腐蚀

氯气和氟气。在较低的温度里，如果气体是完全干燥的，则大部分奥氏体不锈钢都能耐氯气或氟气的腐蚀。即使有少量的潮气存在也会导致侵蚀的加剧，尤其是点蚀和可能的SCC。

氧化。在高温下不锈钢的抗氧化主要靠它们的铬含量。当温度发生周期性变化时，增加镍的含量可以将剥落降至最低程度。表2.7-17列出的是锻压不锈钢可以承受的最高安全使用温度。在断续使用情况下，奥氏体不锈钢的上述最高温度是比较低的，但表中所列的大部分马氏体和铁素体不锈钢的温度都比较高。

表2.7-17　AISI不锈钢在空气中一般可承受的最高使用温度

AISI型号	最高使用温度			
	断续使用		连续使用	
	℃	℉	℃	℉
奥氏体牌号				
201	815	1500	845	1550
202	815	1500	845	1550
301	840	1545	900	1650
302	870	1600	925	1700
304	870	1600	925	1700
308	925	1700	980	1795
309	980	1795	1095	2000
310	1035	1895	1150	2100
316	870	1600	925	1700
317	870	1600	925	1700
321	870	1600	925	1700
330	1035	1895	1150	2100
347	870	1600	925	1700
铁素体牌号				
405	815	1500	705	1300
406	815	1500	1035	1895
430	870	1600	815	1500
442	1035	1895	980	1795
446	1175	2145	1095	2000
马氏体牌号				
410	815	1500	705	1300
416	760	1400	675	1250
420	735	1355	620	1150
440	815	1500	760	1400

空气污染物中带有水和CO_2往往会增加在高温下的腐蚀性。由二氧化硫、硫化氢和硫蒸气引起的硫化反应也会加剧侵蚀的发生。

渗碳。不锈钢的渗碳作用能发生在一氧化碳(CO)、甲烷(CH_4)及其他的碳氢气氛里。当对曾被油或脂污染的不锈钢进行退火时，因为没有足够的氧气使碳燃烧殆尽也会发生碳化作用。带油的型材在真空或惰性气体里的退火或者在敞开的空气中退火由于空气被油阻隔都会发生渗碳。铬、硅和镍对于阻止渗碳都是有用的。

氮化。在高温下，氨(NH_3)的分解会促使氮化的发生。耐氮化取决于合金的成分以及NH_3的浓度、温度、压力。不锈钢在纯NH_3和大约540℃(100℉)(原文如此,似为1000之误——译者注)很容易遭受侵蚀。

在液态金属中的腐蚀

18-8不锈钢有很强的耐液态钠或钠-钾合金腐蚀的能力。在540℃(1000℉)以下不会发生物质转移，在870℃(1600℉)以下能保持在中等的低程度上。不锈钢若含有杂质氧，则会在液态钠中加速侵蚀，其$w(O)$约为0.02%时，会有明显的影响。

暴露在动态条件下的熔融铅里常会让普通的不锈钢合金系统造成物质转移。在强氧化条件下，会发生特别严重的腐蚀。不锈钢在熔融的铝、锌、锑、铋和锡中会遭受一般性的侵蚀。

精选参考文献

- *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 123–128 (intergranular corrosion/sensitization), 344–368 (weldments), 547–565 (overview of stainless steels), 927–1010 (power industry), 1134–1185 (chemical processing industry), 1186–1220 (pulp and paper industry), 1226–1231 (pharmaceutical industry), and 1232–1287 (oil industry).
- J.R. Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, ASM International, 1994, p 133–180 (atmospheric and aqueous corrosion), 181–204 (stress-corrosion cracking and hydrogen embrittlement), 205–228 (high-temperature corrosion), and 238–254 (weldments).
- Elevated-Temperature Corrosion Properties of Stainless Steels, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p159–178.
- A.J. Sedriks, *Corrosion of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, 1979.
- A.J. Sedriks, Stress-Corrosion Cracking of Stainless Steels, *Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation*, R.H. Jones, Ed., ASM International, 1992, p 91–130.

第4节　铸造不锈钢

铸造不锈钢由于其在水性介质中，及在室温或接

近室温时的耐腐蚀性以及还能在热气体和高温液体中应用而得到广泛应用。这些高合金铸造钢一般含有超过10% Cr(质量分数)，并主要由不锈钢组成。不锈钢铸件通常按照耐腐蚀铸件(用于水性介质里，温度低于650℃或1200℉)或者耐热铸件(适用于高于650℃或1200℉的用途)进行分类。然而这条以用途划分的分界线并不总是很清晰，尤其对于用于温度范围从480~650℃(900~1200℉)的用途。耐热和耐腐蚀铸钢通常根据碳的含量进行区分，即正常情况下耐热牌号有较高的含碳量。

铸、锻牌号的比较

一般而言，铸、锻不锈钢具有彼此相当的耐腐蚀性介质的能力，而且它们通常也相互结合起来使用。然而在一些铸造不锈钢和与之相应的锻压不锈钢之间也存在着重要的差别。

铁素体含量的作用。在铸造和锻压牌号之间的一个明显不同就在于铸造奥氏体不锈钢的显微组织。在奥氏体不锈钢的铸件里存在着少量的铁素体，这相对于锻压合金为单相奥氏体组织。铸件中存在着铁素体是出于便于焊接维修的需要，但铁素体还会增加抗应力腐蚀开裂(SCC)。与成分大约相当的锻压不锈钢相比，铸造不锈钢只有为数不多的几种SCC失效形式。这种耐腐蚀性的主要缘由显然是为提高其流动性而加入硅，为此从SCC方面看也是有利的，而且砂型铸件通常用抖动和吹砂的方法将型砂、氧化皮除去，否则有可能在其表面留下压痕。

铁素体的害处。铁素体在某些用途里可能会有害。其中一个需要关心的问题是铁素体引起的韧性下降，虽然这对于韧性特别高的奥氏体基体并不是一个主要问题。而更加需要关注的问题是要求暴露在高温，通常为315℃(600℉)或其以上温度里的应用，此时发生的与铁素体有关的金相变化将是很严重的和有害的。在需要将这种钢在425~650℃(800~1200℉)的范围里加热的用途里，铁素体区域的边缘要先于奥氏体的边界析出碳化物。当钢被加热至540℃(1000℉)以上时，铁素体区域将转变成为σ相或χ相。如果这种区域以此种方式分布，将会形成一种连续的网络并造成其脆化或成为一种腐蚀穿透的网络。还有，如果铁素体数量太多，铁素体就会形成发生腐蚀的连续长链，形成一种类似于晶界侵蚀的状况。

铁素体的控制。铸造不锈钢的主要元素组分在合金显微组织里面竞相形成奥氏体或铁素体相。铬、硅、钼和铌能促进铁素体在合金显微组织里的存在，镍、碳、氮和锰则促进奥氏体的存在。通过权衡形成铁素体和奥氏体的元素，在特定合金中各种规定元素范围里的含量就有可能控制铁素体在奥氏体基体里存在的数量。合金通常可以按照从全奥氏体到规定铁素体含量在奥氏体基体中占30%或以上进行生产。

性能比较。锻压和铸造不锈钢也可以按力学性能、磁学性能和化学成分进行区分。铸造不锈钢由于可能存在大型枝状晶粒、晶间相和合金偏析，其典型力学性能不但有较大的变化，而且还低于任何锻件金相组织的这些性能。

牌号的代号及其成分

铸造不锈钢最为常用的代号规定是建立在成分的基础上，并且利用了美国铸造者协会高合金产品组(the High Alloy Product Group of Steel Founder's Society of America)的代号系统(美国铸造者协会现已取代合金铸造学会,ACI,后者是原来负责这些代号的规定)。代号的第一个字母表示合金是主要适合于液体腐蚀的用途(C)还是高温用途(H)。第二个字母代表合金的名义上的铬-镍型号(见图2.7-14)。随着镍含量的增加，代号的第二个字母也要改变。在第一、二位字母后面的数字或一组数字表示合金的最高含碳量(百分数×100)。最后如另外还有合金元素存在，它们就再加上一个或多个字母作为字尾表示。于是代号CF-8M指的是19Cr-9Ni型号的耐腐蚀用途(C)的合金(见图2.7-14)，其最高含碳量为0.08%并含有钼(M)。与此类似的，代号HK-40指的是型号26CR-20Ni的耐热用途(H)的合金(见图2.7-14)，其最高含碳量为0.40%。

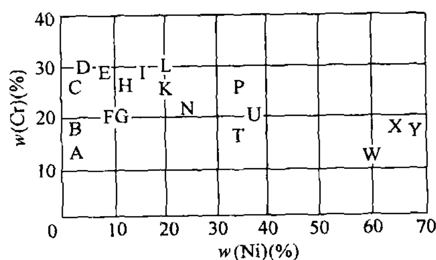


图2.7-14 用于耐热和耐腐蚀的钢铸件的ACI标准牌号中的铬和镍的含量

一些高合金铸造钢展示了许多与铸造碳素钢和低合金钢相同的性能。这些牌号的一些力学性能(例如硬度和抗拉强度)都能通过适当的热处理予以改变。然而w(Cr)超过20%~30%加上镍的铸造高合金并不显示普通碳素钢和低合金钢在室温和熔点之间进行加热和冷却时所能见到的那种相变。因此这些材料无法被硬化，因而它们的性能则取决于成分而不是热处

理。所以必须对于每一种牌号的高合金钢铸件的有关设计、铸造工艺及其后续的热态处理(如果需要)予以专门的考虑。

耐腐蚀钢铸件

成分。在液体腐蚀中使用的C-型号的钢铸件常按照成分分类，尽管应该认识到按成分的分类也还需顾及其显微组织的区分。

表2.7-18所示是工业上用的铸造耐腐蚀合金的成分。合金分组为铬钢、铬-镍钢(其中铬作为主要合金化元素)和镍-铬合金(其中镍作为主要合金化元素)。

表2.7-18　耐腐蚀铸造钢的成分和典型显微组织

ACI 型号	UNS 编号	锻压合金型号①	显微组织②	化学成分③(质量分数,%)					
				C	Mn	Si	Cr	Ni	其他④
铬钢									
CA-15	J91150	410	M	0.15	1.00	1.50	11.5~14.0	1.0	0.50Mo⑤
CA-15M	J91151	—	M	0.15	1.00	0.65	11.5~14.0	1.0	0.15~1.00Mo
CA-40	J91153	420	M	0.40	1.00	1.50	11.5~14.0	1.0	0.5Mo⑤
CA-40F	—	—	M	0.2~0.4	1.00	1.50	11.5~14.0	1.0	—
CB-30	J91803	431，442	F和C	0.30	1.00	1.50	18.0~22.0	2.0	—
CC-50	J92615	446	F和C	0.30	1.00	1.50	26.0~30.0	4.0	—
铬-镍钢									
CA-6N	—	—	M	0.06	0.50	1.00	10.5~12.5	6.0~8.0	—
CA-6NM	J91540	—	M	0.06	1.00	1.00	11.5~14.0	3.5~4.5	0.4~1.0Mo
CA-28MWV	J91422	—	M	0.20~0.28	0.50~1.00	1.00	11.0~12.5	0.50~1.00	0.9~1.25Mo；0.9~1.25W；0.2~0.3V
CB-7Cu-1	J92180	17~4PH	M，AH	0.07	0.70	1.00	15.5~17.7	3.6~4.6	2.5~3.2Cu；0.20~0.35Nb；0.05N max
CB-7Cu-2	J92110	—	M，AH	0.07	0.70	1.00	14.0~15.5	4.5~5.5	2.5~3.2Cu；0.20~0.35 Nb；0.05N max
CD-4MCu	J93370	—	A在F中，AH	0.04	1.00	1.00	25.0~26.5	4.75~6.0	1.75~2.25Mo；2.75~3.25Cu
CE-30	J93423	312	F在A中	0.30	1.50	2.00	26.0~30.0	8.0~11.0	—
CF-3⑥	J92500	304L	F在A中	0.03	1.50	2.00	17.0~21.0	8.0~12.0	—
CF-3M⑥	J92800	316L	F在A中	0.03	1.50	2.00	17.0~21.0	8.0~12.0	2.0~3.0Mo
CF-3MN	J92700	—	F在A中	0.03	1.50	1.50	17.0~21.0	9.0~13.0	2.0~3.0Mo；0.1G~0.20N
CF-8⑥	J92600	304	F在A中	0.08	1.50	2.00	18.0~21.0	8.0~11.0	—
CF-8C	J92710	347	F在A中	0.08	1.50	2.00	18.0~21.0	9.0~12.0	Nb⑦
CF-8M	J92900	316	F在A中	0.08	1.50	2.00	18.0~21.0	9.0~12.0	2.0~3.0Mo
CF-10	J92590	—	F在A中	0.04~0.10	1.50	2.00	18.0~21.0	8.0~11.0	—
CF-10M		—	F在A中	0.04~0.10	1.50	1.50	18.0~21.0	9.0~12.0	2.0~3.0Mo
CF-10MC	J92971	—	F在A中	0.10	1.50	1.50	15.0~18.0	13.0~16.0	1.75~2.25Mo
CF-10SMnN	—	—	F在A中	0.10	7.00~9.00	3.50~4.50	16.0~18.0	8.0~9.0	0.08~0.18N
CF-12M	—	316	F在A中或A	0.12	1.50	2.00	18.0~21.0	9.0~12.0	2.0~3.0Mo

（续）

ACI 型号	UNS 编号	锻压合金型号①	显微组织②	化学成分③（质量分数,%）					
				C	Mn	Si	Cr	Ni	其他④
铬-镍钢									
CF-16F	J92701	303	A	0.16	1.50	2.00	18.0~21.0	9.0~12.0	≤1.50Mo；0.20~0.35Se
CF-20	J92602	302	A	0.20	1.50	2.00	18.0~21.0	8.0~11.0	—
CG-6MMN	J93790	—	F在A中	0.06	4.00~6.00	1.00	20.5~23.5	11.5~13.5	1.50~3.00Mo；0.10~0.30Nb；0.10~30V；0.20~40N
CG-8M	J93000	317	F在A中	0.08	1.50	1.50	18.0~21.0	9.0~13.0	3.0~4.0Mo
CG-12	—	—	F在A中	0.12	1.50	2.00	20.0~23.0	10.0~13.0	—
CH-8	J93400	—	F在A中	0.08	1.50	1.50	22.0~26.0	12.0~15.0	—
CH-10	J93401	—	F在A中	0.04~0.10	1.50	2.00	22.0~26.0	12.0~15.0	—
CH-20	J93402	309	A	0.20	1.50	2.00	22.0~26.0	12.0~15.0	—
CK-3MCuN	—	254SMO	F在A中	0.025	1.20	1.00	19.5~20.5	17.5~19.5	6.0~7.0M0；0.18~0.24N；0.50~1.00Cu
CK-20	J94202	310	A	0.20	2.00	2.00	23.0~27.0	19.0~22.0	—
镍-铬钢									
CN-3M	—	—	A	0.03	2.00	1.00	20.0~22.0	23.0~27.0	4.5~5.5Mo
CN-7M	—	320	A	0.07	1.50	1.50	19.0~22.0	27.5~30.5	2.0~3.0Mo；3.0~4.0Cu
CN-7MS	J94650	—	A	0.07	1.50	3.50⑧	18.0~20.0	22.0~25.0	2.5~3.0Mo；1.5~2.0Cu
CT-15C	—	—	A	0.05~0.15	0.15~1.50	0.50~1.50	19.0~21.0	31.0~34.0	0.5~1.5V

①所列的锻压合金型号编号仅为相应铸造和锻压牌号在名义上的确认。铸造合金的成分同与之相应的锻压合金的并不相同，铸造合金代号应该仅限用于铸件。 ②M，马氏体；F，铁素体；C，碳化物；AH，可时效硬化的；A，奥氏体。 ③除非标有范围，否则均为最大值。所有成分以铁为余量。 ④硫的含量除以下代号外，均为0.04%P（最高）：CG-6MMN，0.030%S（最高）；CF-10SMnN，0.03%S（最高）；CT-15C，0.03%S（最高）；CK-3MCuN，0.010%S（最高）；CN-3M，0.03%S（最高）；CA-6N，0.020%S（最高）；CA-28MWV，0.030%S（最高）；CA-40F，0.02%~0.40%S；CB-7Cu-1和-2，0.03%S（最高）以外的所有均为0.04%S。磷的含量除CF-16F，0.17%P（最高）；CF-10SMnN，0.060%P（最高）；CT-15C，0.030%P（最高）；CK-3MCuN，0.045%P（最高）；CN-3M，0.030%P；（最高）；CA-6N，0.020%P（最高）；CA-28MWV，0.030%P（最高）；CB-7Cu-1和-2，0.035%P（最高）。 ⑤不加入钼。 ⑥CF-3A、CF-3MA和CF-8A分别与CF-3、CF-3M和CF-8有相同的成分范围，但是成分必须达到平衡，以此使铁素体能保证其力学性能的技术参数要高于相关牌号的技术参数。它们应符合ASTM A351的规定。 ⑦Nb，8×%C最低（1.0%最高）；或Nb+Ta×%C（1.1%最高） ⑧对于CN-7MS，w(Si)为2.50%~3.50%。

铸造耐腐蚀钢的应用性很大程度上取决于在合金显微组织中碳的缺失，特别是析出的碳化物。因此铸造耐腐蚀合金一般都是低含碳量（通常w(C)低于0.20%，有时w(C)低于0.03%）。

所有的耐腐蚀钢都含有（质量分数）超过11%Cr，大部分含有1%~30%的Ni（有一些含有低于1%Ni）。在美国生产的耐腐蚀钢铸件里，大约有三分之二的属于含有18%~22%Cr和8至12%Ni的牌号。

一般来说，在铁-铬合金里加入镍可改善其塑性和冲击强度。增加含镍量能提高在中性盐酸盐溶液和弱氧化酸里的耐腐蚀性。

加入钼能提高在氯化物溶液里的耐点蚀侵蚀的能

力，它还能扩大在低氧化特性的溶液里的钝性范围。

在双相(铁素体在奥氏体中)的镍-铬合金里加入铜可以使其合金析出硬化到较高的强度和硬度。在单相奥氏体合金里加入铜能大大提高其对硫酸的耐腐蚀能力。在所有 Fe-Cr-Ni 不锈钢里，都能通过降低其含碳量来提高会造成晶间侵蚀的介质的耐腐蚀性。

室温的力学性能。表 2.7-19 所列的是耐腐蚀铸造钢在室温里有代表性的拉伸性能、硬度和夏比冲击值。这些性能是合金有代表性的数值而不是技术要求。这些合金所规定的最小力学性能可查阅 ASTM A351、A743、A744 和 A747。它们的力学性能根据合金的成分和热处理可以有很大的选择范围。在这些铸造耐腐蚀合金中，抗拉强度的范围为 475 ~ 1310MPa (69 ~ 190ksi)，硬度为 130 ~ 400HB。同样的，屈服强度、伸长率和冲击韧性也有很大的范围。

腐蚀特性。如前所述，铸造和锻压的不锈钢的腐蚀特性是十分相似的(参阅本章第 3 节)。

表 2.7-20 比较了 C-型号的耐一般的腐蚀性。

表 2.7-19　铸造耐腐蚀合金的室温力学性能

合　金	热处理①	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	断面收缩率(%)	硬度HB	夏比冲击吸收功		
		MPa	ksi	MPa	ksi				J	lbf·ft	试　件
CA-6NM	>955℃(1750℉)，AC，T	827	120	689	100	24	60	269	94.9	70	V形缺口
CA-15	980℃(1800℉)，AC，T	793	115	689	100	22	55	225	27.1	20	键孔缺口
CA-40	980℃(1800℉)，AC，T	1034	150	862	125	10	30	310	2.7	2	键孔缺口
CB-7Cu	1040℃(1900℉)，OQ，A	1310	190	1172	170	14	54	400	33.9	25	V形缺口
CB-30	790℃(1450℉)，AC	655	95	414	60	15	—	195	2.7	2	键孔缺口
CC-50	1040℃(1900℉)，AC	669	97	448	65	18	—	210	—	—	—
CD-4MCu	1120℃ (2050℉)，FC 至 1040℃(1900℉)，WQ	745	108	558	81	25	—	253	74.6	55	V形缺口
	1120℃ (2050℉)，FC 至 1040℃(1900℉)，A	896	130	634	92	20	—	305	35.3	26	V形缺口
CE-30	1095℃(2000℉)，WQ	669	97	434	63	18	—	190	9.5	7	键孔缺口
CF-3	>1040℃(1900℉)，WQ	531	77	248	36	60	—	140	149.2	110	V形缺口
CF-3A	>1040℃(1900℉)，WQ	600	87	290	42	50	—	160	135.6	100	V形缺口
CF-8	>1040℃(1900℉)，WQ	531	77	255	37	55	—	140	100.3	74	键孔缺口
CF-8A	>1040℃(1900℉)，WQ	586	85	310	45	50	—	156	94.9	70	键孔缺口
CF-20	>1095℃(2000℉)，WQ	531	77	248	36	50	—	163	81.4	60	键孔缺口
CF-3M	>1040℃(1900℉)，WQ	552	80	262	38	55	—	150	162.7	120	V形缺口
CF-3MA	>1040℃(1900℉)，WQ	621	90	310	45	45	—	170	135.6	100	V形缺口
CF-8M	>1065℃(1950℉)，WQ	552	80	290	42	50	—	170	94.9	70	键孔缺口
CF-8C	>1065℃(1950℉)，WQ	531	77	262	38	39	—	149	40.7	30	键孔缺口
CF-16F	>1095℃(2000℉)，WQ	531	77	276	40	52	—	150	101.7	75	键孔缺口
CG-8M	>1040℃(1900℉)，WQ	565	82	303	44	45	—	176	108.5	80	V形缺口
CH-20	>1095℃(2000℉)，WQ	607	88	345	50	38	—	190	40.7	30	键孔缺口
CK-20	1150℃(2100℉)，WQ	524	76	262	38	37	—	144	67.8	50	悬臂V形缺口
CN-7M	1120℃(2050℉)，WQ	476	69	214	31	48	—	130	94.9	70	键孔缺口

①AC，空气冷却；FC，炉冷却；OQ，油淬；WQ，水淬；T，回火；A，时效。

表 2.7-20 不同耐腐蚀铸造钢的应用总览

合 金	特 性
CA-15	广泛用于缓和的腐蚀介质中，可硬化，良好的耐腐蚀性
CA-40	在较高的强度下类似于 CA-15
CA-6NM	经改进的性能超过 CA-15，特别提高其耐气蚀性
CA-6N	突出的强度、韧性和焊接性的性能组合，并具有中等耐腐蚀性
CB-30	比较 CA-15 在氧化介质中的性能有所提高，极佳的耐硝酸、碱溶液及许多有机化学物质腐蚀的能力
CB-7Cu-1	可硬化并有良好的耐腐蚀性
CB-7Cu-2	优良的强度、韧性和焊接性的性能组合，并具有中等耐腐蚀性
CC-50	用于强氧化介质(热 HNO_3、酸性矿坑水)
CD-4MCu	类似于 CF-8 的耐腐蚀性，但具有较高的强度、硬度和耐应力腐蚀开裂。在磨料和冲蚀的腐蚀介质里有极佳的耐腐蚀性，在同时处置氧化和还原的腐蚀时十分有用
CE-30	类似于 CC-50，但镍能促成较高的强度和韧性。一种易于控制铁素体的牌号
CF-3、CF-8、CF-20、CF-3M、CF-8M、CF-8C、CF-16F	CF 型号：大部分为能广泛应用于室温和低温的耐腐蚀合金；M 变型：增强在卤素离子和还原酸里的耐腐蚀性；C 和 F 变型：适用于不允许进行焊后热处理的用途
CG-8M	具有比 CF-8 更大的耐点蚀和耐在还原介质中腐蚀的能力，不适用于硝酸或其他强氧化的介质
CH-20	在特种化学物质和造纸应用中，具有优于 CF-8 的耐热 H_2SO_3、有机酸和稀 H_2SO_4 腐蚀的能力；高镍和高铬含量能使其减少由于经过在碳化物析出温度里的暴露后所形成的对于晶间腐蚀的敏感性
CK-20	相比 CH-20，其耐腐蚀得到提高
CN-7M	对 H_2SO_4、H_3PO_4、H_2SO_3、盐和海水的高耐腐蚀性。良好的耐热氯化物盐溶液、硝酸和许多还原化学物质的腐蚀性

钢铸件的耐热性

如前所述，如果铸件在连续或间断的工作温度里，使其金属在承受超过 650℃(1200℉)的温度下尚能持续运行，就能将其归类于有耐热性的。耐热性同与之相对应的耐腐蚀性之间的主要差别在于它们的含碳量。除少数例外，铸造耐热合金的 w(C) 处于 0.3%~0.6% 的范围里，与之相比锻压和铸造耐腐蚀牌号的 w(C) 通常从 0.01%~0.25%。这种含碳量上的不同造成它们在性能上的明显差别，例如铸造耐热钢具有较高的蠕变断裂强度。

表 2.7-21 所列的是标准铸造耐热牌号的成分。这些符合 ASTM 技术指标的材料含(质量分数)有 0~68% Ni 和 8%~32% Cr，加上 2.5% Si 和 2.0% Mn，并以铁作为其余量。

表 2.7-21 标准耐热铸造合金的成分

锻压合金型号[①]	ACI 代号	UNS 编号	化学成分[②](质量分数,%)			
			C	Cr	Ni	Si (最高)
—	HA	—	0.20 最高	8~10	—	1.00
446	HC	J92605	0.50 最高	26~30	4 最高	2.00
327	HD	J93005	0.50 最高	26~30	4~7	2.00
312	HE	J93403	0.20~0.50	26~30	8~11	2.00
302B	HF	J92603	0.20~0.40	19~23	9~2	2.00
309	HH	J93503	0.20~0.50	24~28	11~14	2.00
—	HI	J94003	0.20~0.50	26~30	14~18	2.00

（续）

锻压合金型号①	ACI代号	UNS编号	化学成分②（质量分数，%）			
			C	Cr	Ni	Si（最高）
310	HK	J94224	0.20~0.60	24~38	18~22	2.00
—	HK-30	J94203	0.25~0.35	23.0~27.0	19.0~22.0	1.75
—	HK-40	J94204	0.35~0.45	23.0~27.0	19.0~22.0	1.75
—	HL	N08604	0.20~0.60	28~32	18~22	2.00
—	HN	J94213	0.20~0.50	19~23	23~27	2.00
—	HP	N08705	0.35~0.75	24~28	33~37	2.00
—	HP-50WZ③	—	0.45~0.55	24~28	33~37	2.50
330	HT	N08605	0.35~0.75	13~17	33~37	2.50
—	HT-30	N08603	0.25~0.35	13.0~17.0	33.0~37.0	2.50
—	HU	N08005	0.35~0.75	17~21	37~41	2.50
—	HW	N08006	0.35~0.75	10~14	58~62	2.50
—	HX	N06050	0.35~0.75	15~19	64~68	2.50

①所列锻压合金的型号编号仅为名义上确认的相应锻压和铸造牌号。铸造牌号的成分范围与相应的锻压合金并不相同，铸造合金代号应该只适用于铸件。②在所有的成分中，均以Fe为其余量。锰含量：HA为0.35%~0.65%、HC为1%、HD为1.5%以及其他合金均为2%。磷和硫含量：除HP-50W以外，均为0.04%（最高）。只有HA加入的钼含量为0.90%~1.20%，其余合金的最高含量均为0.5%Mo。HH还含0.2%N（最高）。③还含有4%~6%W、0.1~1.0%Zr以及0.035%的S（最高）和P（最高）。

标准耐热合金可以简单地只根据其组织进行分类。含（质量分数）8%~30%Cr和高至4%Ni的牌号HA和HC都是铁素体。牌号HD、HE、HF和HH显示的是铁素体与奥氏体的双相组织，而剩下的HK至HX则为全奥氏体。

第三种不同的分类法是以主要元素的含量增加为顺序，这些元素分为以下四组：

- 铁-铬；
- 铁-铬-镍；
- 铁-镍-铬；
- 镍-铁-铬。

铁-铬合金。在本组中的三种合金就是通常所说的HA、HC和HD，虽然只有其中第一种合金专门指的是铁-铬合金。另外两种牌号还含（质量分数）有26%~30%Cr和高至7%的Ni。这些牌号主要应用于含硫气体的介质，此时高温强度不是一个重要考虑的因素。

铁-铬-镍合金。在本组里的合金含（质量分数）有18%~32%Cr和8%~22%Ni，其铬含量总是超过镍，它们的牌号包括HE、HF、HH、HI、HK和HL。而这些合金都可认为是奥氏体的，成分组成中含镍较低的将会含有一些铁素体。在本组里，铁素体转变为脆性σ相是一个需关注的问题，甚至在较高镍的牌号里都会有这样的问题，特别是如果它们的成分平衡倾向于铁素体。本组合金的高温强度要高于铁-铬合金的，它们的蠕变和断裂强度将随含镍量的增加而提高。

铁-镍-铬合金。在本组中有四种标准牌号，HN、HP、HT和HU，含（质量分数）有15%~28%Cr和23%~41%Ni。镍的含量肯定超过铬含量。这些合金具有稳定的奥氏体组织、良好的高温强度以及增强耐热循环和热应力的能力，并结合其在氧化和还原的介质中高耐腐蚀的能力。

镍-铁-铬合金。在本组里有两种标准牌号即HX和HW，它们含有58%~68%Ni和10%~19%Cr。即通常所指的高合金钢，更确切地应表述为镍基合金。当它们拥有中等的高温断裂强度时，其蠕变强度是很低的。这些牌号有其标准合金的最高抗渗碳的能力。

非标准牌号成分。耐热合金的非标（专用的）牌号一般为更高的合金。铝、钴（至15%）、钼（0.5%~1.5%）、铌（0.5%~1.5%）、稀土金属（铈、镧和钇）、钛（0.1%~0.3%）、钨（一般为1%~5%，但可高至16%）和锗的单一或多种元素的加入都是为了增强特定的性能，如高温强度、防渗碳和耐热循环。

一般性能。表2.7-22列出室温下耐热铸钢的拉伸性能，表2.7-23为选定的几种合金蠕变性能，高温耐腐蚀性能的比较则可见于表2.7-24。ASTM A297、A351、A447和A608给出了这些合金的一些规定力学性能的最小值。

表 2.7-22 耐热铸造合金的典型室温性能

合金	状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率	硬度
		MPa	ksi	MPa	ksi	(%)	HB
标准牌号							
HA	N+T①	738	107	558	81	21	220
HC	铸造	760	110	515	75	19	223
	时效②	790	115	550	80	18	—
HD	铸造	585	85	330	48	16	90
HE	铸造	655	95	310	45	20	200
	时效②	620	90	380	55	10	270
HF	铸造	635	92	310	45	38	165
	时效②	690	100	345	50	25	190
HH，型号1	铸造	585	85	345	50	25	185
	时效②	595	86	380	55	11	200
HH，型号2	铸造	550	80	275	40	15	180
	时效②	635	92	310	45	8	200
HI	铸造	550	80	310	45	12	180
	时效②	620	90	450	65	6	200
HK	铸造	515	75	345	50	17	170
	时效③	585	85	345	50	10	190
HL	铸造	565	82	360	52	19	192
HN	铸造	470	68	260	38	13	160
HP	铸造	490	71	275	40	11	170
HT	铸造	485	70	275	40	10	180
	时效③	515	75	310	45	5	200
HU	铸造	485	70	275	40	9	170
	时效④	505	73	295	43	5	190
HW	铸造	470	68	250	36	4	185
	时效⑤	580	84	360	52	4	205
HX	铸造	450	65	250	36	9	176
	时效④	505	73	305	44	9	185

①675℃（1250℉）正火和回火。 ②时效处理：760℃（1400℉）24h 炉冷。 ③时效处理，760℃（1400℉）24h 空冷。 ④时效处理，980℃（1800℉）48h 空冷。 ⑤时效处理，980℃（1800℉）48h 炉冷。

表 2.7-23 选定的几种标准铸造耐热合金的蠕变性能

牌号	温度		10000h 产生1% 蠕变的蠕变应力		10000h 发生断裂的应力		100000h 的断裂应力	
	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
Fe-Cr-Ni								
HF	650	1200	124	18.0	114	16.5	76	11.0
	760	1400	47	6.8	42	6.1	28	4.0
	870	1600	27	3.9	19	2.7	12	1.7
HH	650	1200	124	18.0	97	14.0	62	9.0
	760	1400	43	6.3	33	4.8	19	2.8
	870	1600	27	3.9	15	2.2	8	1.2
	980	1800	14	2.1	6	0.9	3	0.4
HK	760	1400	70	10.2	61	8.8	43	6.2
	870	1600	41	6.0	26	3.8	17	2.5
	980	1800	17	2.5	12	1.7	7	1.0
Fe-Ni-Cr								
HN	870	1600	43	6.3	33	4.8	22	3.2
	980	1800	16	2.4	14	2.1	9	1.3
HT	760	1400	55	8.0	58	8.4	39	5.6
	870	1600	31	4.5	26	3.7	16	2.4
	980	1800	14	2.0	12	1.7	8	1.1
HU	760	1400	59	8.5	—	—	—	—
	870	1600	34	5.0	23	3.3	—	—
	980	1800	15	2.2	12	1.8	—	—
HX	760	1400	44	6.4	—	—	—	—
	870	1600	22	3.2	—	—	—	—
	980	1800	11	1.6	—	—	—	—

注：一些应力值用外插法计算得到。

表2.7-24　耐热铸造钢的一般耐腐蚀特性

合　　金	腐 蚀 特 性
HA	有良好的高至650℃(1200℉)的耐氧化性，广泛应用于炼油工业
HC	有良好的高至1095℃(2000℉)的耐硫和耐氧化性，但力学性能最小，应用于不考虑强度或高至650℃(1200℉)的中等载荷的用途
HD	有优异的耐硫、耐氧化性和焊接性
HE	比HD更高的耐高温和耐硫的能力
HF	极佳的高至815℃(1500℉)的耐一般腐蚀的能力，具有中等的力学性能
HH	高强度，高至1090℃(2000℉)的耐氧化能力，应用最为广泛
HI	与HH相比，耐氧化能力有所提高
HK	因为其高温强度，作为应力零件广泛应用于高至1150℃(2100℉)的结构用途，具有良好的耐热气体腐蚀，包括含硫气体，且呈现氧化和还原的两种状态(虽然HC、HE和HI在氧化气体里有更大的耐腐蚀性)，应用于空气、氨气、氢气和熔化中性盐里，广泛用于管材和炉子零件
HL	耐硫能力较HK有所提高，特别适用于必须防止有过度生锈剥落的用途
HN	高温中有非常高的强度、耐流动的氧化和还原气体的腐蚀
HP	耐高温的氧化和渗碳气氛的腐蚀
HP-50WZ	与HP相比，在1090℃(2000℉)和以上温度的蠕变断裂强度有所改善
HT	广泛用于热冲击的用途，具有在空气、流动的氧化和还原气体、渗碳气体、盐以及熔化金属里的耐腐蚀性，能满意地用于高至1150℃(2100℉)的氧化气氛和高至1090℃(2000℉)的还原气氛，只要不超过其有限的蠕变应力值
HU	比HT有更高热强度，并常作为超耐腐蚀而被选用
HW	高热强度和电阻，能满意地用于1120℃(2050℉)的强氧化气氛以及高至1040℃(1900℉)、不含有硫的氧化或还原燃烧生成物，耐某些盐和熔化金属
HX	在循环条件下耐热气体腐蚀而不会发生开裂或翘曲，具有在温度高至1150℃(2100℉)的空气、渗碳气体、燃烧气体、流动气体、氢气、熔化氰化物、熔化铅和熔化中性盐里的耐腐蚀性

精选参考文献

- M. Blair, T.L. Stevens, and B. Linskey, Ed., *Steel Castings Handbook*, 6th ed., published jointly by Steel Founders' Society of America and ASM International, 1995.
- Corrosion of Cast Stainless Steels, *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1994, p 229–237.
- High-Alloy Cast Steels, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p 200–218.
- Metallurgy and Properties of Cast Stainless Steels, *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1994, p 66–88.
- M. Prager, Cast High Alloy Metallurgy, *Steel Casting Metallurgy*, J. Svoboda, Ed., Steel Founders' Society of America, 1984, p 221–245.

第5节　粉末冶金不锈钢

粉末冶金(P/M)不锈钢零件代表P/M工业中的一个重要和正在成长的分支。北美的P/M不锈钢的工业生产始于20世纪50年代后期。在P/M不锈钢迅速商业化的第一个十年里，其在北美的应用以复比接近20%的速度增长，达到1973年的2000t/a消耗量。从那时起，它继续以复比约4.6%的速度增长。按照金属粉末工业联盟(Metal Powder Industies Federation, MPIF)统计，北美烧结不锈钢零件目前(大约1997至1998年)的年生产量约为500t。汽车工业是P/M不锈钢的主要市场。主要用途包括防抱死制动系统(ABS)传感环、后视镜支架和连接不同的排气系统零件的法兰。硬件(如锁件和紧固件)、电气和电子元件(如开关和磁性离合器)以及气体、液体的过滤和计量用的可调疏松元件都消耗了大量的P/M不锈钢。

本节将介绍中、高密度的P/M不锈钢的工艺和性能。中密度的材料是通过压制和烧结预合金的不锈钢粉末进行制造的。其达到的密度范围为6.4～7.2g/cm³(约为理论密度的80%～90%)。高密度材料则通过热等静压压制和冷等静压压制，随后再进行挤压或金属注塑。这些材料的密度接近理论密度的95%～99%，甚至达到100%。

烧结P/M不锈钢

工艺

粉末的生产。所有工业用牌号的压实不锈钢粉末都可以用雾化法进行生产。大部分用于传统压制、烧结的粉末都是水雾化而成的。用这种方法生产的粉末是全合金的并且具有不规则颗粒形状、足够的压制性

及适合 P/M 制造的烧结前强度。气体(氮气)雾化用于生产适合高密度用途的球形粉末。这种粉末的形态类似于工具钢粉末，见本手册前一节“工具钢”。

压实和润滑。不锈钢 P/M 零件的设计和制造都要经过作为与其他 P/M 材料基本相同的一些考虑。然而与低合金铁粉相比，不锈钢粉末要求较高的压实压力和要求较低的烧结前强度。图 2.7-15 所示是奥氏体和马氏体牌号的典型压实特性。普通工业用的压实压力范围为 550～830MPa(40～60tsi)。

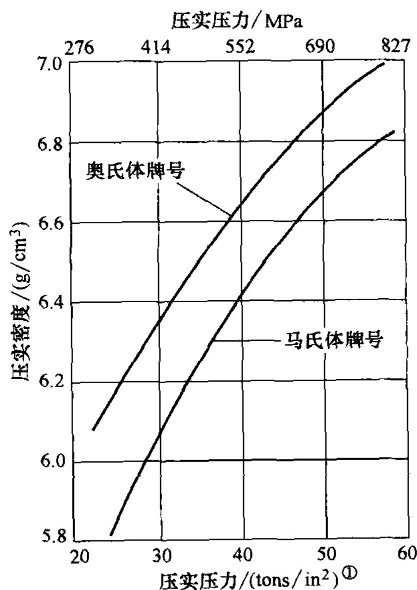


图 2.7-15 不锈钢粉末的一般压实性状，润滑为 1%硬脂酸锂

① 原文有误，应为 tonf/in²。——译者注。

不锈钢压实件的烧结前强度约为 P/M 铁的一半，要受压实压力和润滑剂种类的影响(在 P/M 结构件的制造中，相应预合金粉末所用的润滑剂是为了有利于粉末的压实和零件从压模里脱出)。能提供高烧结前强度的润滑剂(如硬脂酸)一般会造成压制性的降低。因此对于决定不锈钢的成功应用和制造，润滑剂的选择是一个重要因素。硬脂酸锂和合成蜡都是常用的润滑剂。

润滑剂的去除(脱油脂)。在进入实际烧结工序以前，去除油脂是极其重要的，其理由是多方面的。一般来说，这种去除是在烧结预热过程中完成的，即所谓的“烧掉”。由于残余润滑碳在不锈钢烧结时产生严重的负面效应，即造成耐腐蚀能力的下降，故普通采用的烧掉的温度范围为 425～480℃(800～900℉)，与合成蜡润滑剂的使用有关。

烧结。大部分的不锈钢工业烧结都是在带式、推进式、动梁式和真空炉里完成的。典型的烧结气氛包括游离氨(75%(体积)H 和 25%(体积)N)、H_2-N_2混合气体、氢气、所有低露点(-40～-55℃或-40～-65℉)的气氛以及真空。烧结温度范围为 1120～1345℃(2050～2450℉)——较高的烧结温度用于需要改善其力学性能和耐腐蚀性的时候——烧结的时间为 20～60min。烧结不足，无论时间太短还是温度太低，都将造成烧结零件中初始颗粒边界上粘结不够和形成锐利、尖角形的孔隙。如此烧结，使生产的零件表现为高浓度的填隙原子(碳和氧)、耐腐蚀性的低下和力学性能的低劣。

在游离氨(DA)中的烧结。在 1120℃(2050℉)的 DA 里烧结是20 世纪 60、70 年代里烧结不锈钢应用最为广泛的方法。游离氨不仅比氢便宜，而且能将强度提高到与相同代号的锻压不锈钢相当的强度(塑性有些降低)。其密度可以达到理论的 85%～90% 左右。强化是烧结过程中氮吸附的结果。然而氮的吸附会导致氮化铬(Cr_2N)的析出，从而伴之以铬的损耗和耐腐蚀性的下降(即敏感化或晶界腐蚀)。可以通过非常快速的冷却(>200℃/min 或 360℉/min)，并结合较高的露点使氮吸附减少，但这种烧结方法会导致过度的氧化。还应当指出的是，这样的冷却速度并非大多数的工业气氛炉所能够达到的。

在 90% H_2-10% N_2 混合气体中的烧结。这是在 DA 和氢气的两种气氛中烧结的折中。这种混合气氛既降低 DA 气氛高速冷却的要求，又还能提供固溶强化和提高耐腐蚀能力。

在氢气中的烧结。随着对提高 P/M 不锈钢的耐腐蚀性要求的日益增高，以更为定量的数据表征在 DA 气氛中的烧结效用已成为可能，不锈钢零件的制造商也更加愿意采用价格较为昂贵的氢气气氛。高烧结温度(1230℃ 或 2250℉)、低露点(-50℃ 或 -60℉)以及快速冷却的结合可以生产出含量低于 3000ppmN_2的不锈钢，并形成最佳的耐腐蚀性、较低的强度而较高的塑性。

在真空中的烧结。真空气氛与 DA 基或氢气基的气氛有着根本的差别。以现今的真空炉技术比一般所用的气氛炉能更容易地保持低露点和实现快速冷却。为获得真空炉烧结不锈钢的最大耐腐蚀性，必须使因高蒸汽压力和初始表面上存在的氧化物所引起的表面铬损耗降低到最低限度。在氮气或氩气的局部压力约为 1500μmHg 时，烧结可以减少铬的损耗。为使(碳、氧和氮的)填隙原子减至最少，高温真空烧结优于高温气氛烧结。于是，真空烧结的铁素体不锈钢的磁学性能也优于用气氛烧结所得到的。

成分和性能

成分。工业上广泛应用的不锈钢牌号的成分如表2.7-25所示。这些标准MPIF牌号的改进型包括含(质量分数)有1%~2% Sn、2% Cu或6% Mo的合金，以提高其耐腐蚀性；含有3% Si的合金，以有利于液相烧结而得到较高的密度(7.4g/cm³)并改善其耐腐蚀性；以及含有硫化锰的合金，以提高切削加工性。

表2.7-25　标准(MPIF牌号)的P/M不锈钢的成分

代　号	成分[①](质量分数,%)									
	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P	Mo	N
SS-303N1、N2	余量	17.0~19.0	8.0~13.0	0~2.0	0~1.0	0.15~0.30	0~0.15	0~0.20	—	0.20~0.60
SS-303L	余量	17.0~19.0	8.0~13.0	0~2.0	0~1.0	0.15~0.30	0~0.03	0~0.20	—	0~0.03
SS-304N1、N2	余量	18.0~20.0	8.0~12.0	0~2.0	0~1.0	0~0.03	0~0.08	0~0.045	—	0.20~0.60
SS-304I	余量	18.0~20.0	8.0~12.0	0~2.0	0~1.0	0~0.03	0~0.03	0~0.045	—	0~0.03
SS-316N1、N2	余量	16.0~18.0	10.0~14.0	0~2.0	0~1.0	0~0.03	0~0.08	0~0.045	2.0~3.0	0.20~0.60
SS-316L	余量	16.0~18.0	10.0~14.0	0~2.0	0~1.0	0~0.03	0~0.03	0~0.045	2.0~3.0	0~0.03
SS-409L[②]	余量	10.5~11.75	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.03	0~0.04	—	0~0.03
SS-410	余量	11.5~13.5	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.25	0~0.04	—	0.20~0.60
SS-410L	余量	11.5~13.5	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.03	0~0.04	—	0~0.03
SS-430N2	余量	16.0~18.0	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.08	0~0.04	—	0.20~0.60
SS-430L	余量	16.0~18.0	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.03	0~0.04	—	0~0.03
SS-434N2	余量	16.0~18.0	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.08	0~0.04	0.75~1.25	0.20~0.60
SS-434L	余量	16.0~18.0	—	0~1.0	0~1.0	0~0.03	0~0.03	0~0.04	0.75~1.25	0~0.03

①成分可以包括为特定需要而加入的其他元素(2.0%最大)。　②还包括铌(8×%C~0.80%最大)。引自MPIF标准35，1997版。

切削性能。烧结不锈钢的切削性能是由粉末特性、烧结密度和烧结参数所决定的。就像其他的P/M材料一样，较高密度的烧结不锈钢具有较高的强度。较高的烧结温度和较长的烧结时间，会形成更为圆滑的孔隙并有助于晶粒的生长，两者都能提高零件的塑性和冲击强度。低碳、氮和氧的含量也能提高塑性。高碳残余量可以增加强度和硬度。在较低露点氢气里，烧结可增加致密性和塑性。如果通过优化石墨的加入进行真空烧结，那么600~800ppm的低含氧量将能提高塑性和韧性。图2.7-16比较了型号316L不锈钢分别在DA和H_2中烧结后的零件屈服强度和塑性。如前所述，在DA中烧结的零件比在氢气中烧结的有更高的强度和更低的塑性。在真空中烧结的不锈钢的力学性能与在氢气中烧结不锈钢的相似。表2.7-26所列是标准(MPIF)奥氏体、铁素体和马氏体牌号的力学性能。

尺寸变化。如图2.7-16所示，在氢气(或真空)中的烧结尤其在较高温下，会产生相当大的收缩，由此损害零件的精度。为此，这种零件在烧结后常要进行修整。

耐腐蚀性。在P/M不锈钢零件生产中，最常见的工艺问题就是涉及不适当的润滑、烧结炉里超过露点、烧结后的缓慢冷却速度以及铁或低合金钢粉末的污染。不合适的脱油脂会导致高残余碳和/或氧的含量，由此造成晶间腐蚀和点蚀。超过露点最常见的是造成烧结零件表层在冷却过程中发生氧化。其所吸附的氧气的量通常非常少，以致难以用常规的氧气分析方法进行鉴别或者以其表面的褪色进行识别。这种状况引起低耐点蚀性。缓慢的冷却速度会造成碳化物在晶界上析出，其方式与锻压不锈钢发生的敏感化如出一辙。在含氮气氛里的缓慢冷却会导致零件表面氮的吸附，并形成氮化铬，从而又削弱其耐腐蚀性。混杂有少量的惰性金属粉末会引起电腐蚀。表2.7-27概括了工艺变量对P/M不锈钢耐腐蚀性的影响。

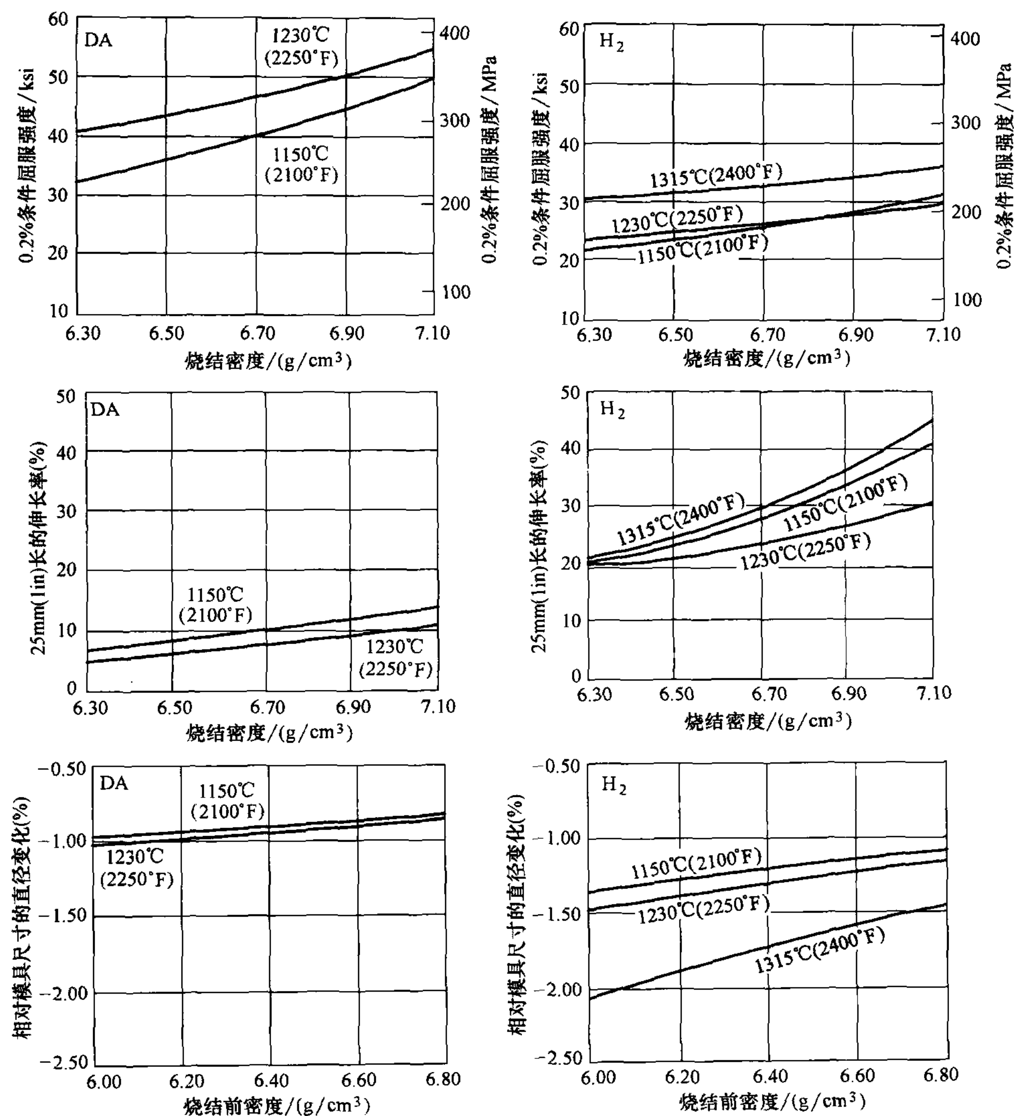


图 2.7-16 316L 不锈钢的压实块分别在游离氨(DA)和氢气(H_2)中烧结后的屈服强度、伸长率和断面收缩率的比较

表 2.7-26 标准(MPIF)P/M 不锈钢的最低和一般性能

代 号①	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	无缺口夏比冲击吸收功		0.1%压缩屈服强度		横向断裂强度		表观洛氏硬度	密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	lbf·ft	MPa	ksi	MPa	ksi		
SS-303N1-25②	270	39	220	32	0.5	5	3.5	260	38	590	86	62HRB	6.4
SS-303N2-35②	380	55	290	42	5.0	26	19	320	46	680	99	63HRB	6.5
SS-303N2-38②	470	68	310	45	10.0	47	35	320	46	—	—	70HRB	6.9
SS-303L-12②	270	39	120	17	17.5	54	40	140	20	570	83	21HRB	6.6
SS-303L-15②	330	48	170	25	20.0	75	55	200	29	—	—	35HRB	6.9

（续）

代号①	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率(%)	无缺口夏比冲击吸收功		0.1%压缩屈服强度		横向断裂强度		表观洛氏硬度	密度/(g/cm³)
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	lbf · ft	MPa	ksi	MPa	ksi		
SS-304N1-30②	300	44	260	38	0.5	5	3.5	260	38	770	112	61HRB	6.4
SS-304N2-33②	390	57	280	41	10.0	34	25	320	46	880	128	62HRB	6.5
SS-304N2-38②	480	70	310	45	13.0	75	55	320	46	—	—	68HRB	6.9
SS-304L-13②	300	44	120	17	23.0	61	45	150	22	—	—	30HRB	6.6
SS-304L-18②	390	57	180	26	26.0	108	80	190	28	—	—	45HRB	6.9
SS-316N1-25②	280	41	230	33	0.5	7	5	250	36	740	107	59HRB	6.4
SS-316N2-33②	410	59	270	39	10.0	38	28	300	44	860	125	62HRB	6.5
SS-316N2-38②	480	70	310	45	13.0	65	48	320	46	—	—	65HRB	6.9
SS-316L-15②	280	41	140	20	18.5	47	35	150	22	550	80	20HRB	6.6
SS-316L-22②	390	57	210	30	21.0	88	65	200	29	—	—	45HRB	6.9
SS-410-90HT③	720	104	④	④	<0.5	3	2	640	93	780	113	23HRC⑤	6.5
SS-410L-20②	330	48	180	26	16.0	68	28	190	28	—	—	45HRB	6.9
SS-430N2-28②	410	59	240	35	5.0	34	25	230	33	—	—	70HRB	7.1
SS-434L-24②	340	49	210	30	20.0	108	80	230	33	—	—	45HRB	7.1
SS-434N2-28②	410	59	240	35	8.0	20	15	230	33	—	—	68HRB	7.0
SS-434L-24②	340	49	210	30	15.0	88	65	230	33	—	—	50HRB	7.0

注：最小强度值(以 ksi 为单位)规定由表中第一列牌号里的词尾数字表示。其他各列均为典型数值。

①不锈钢代号的代码：N1，高强度、低伸长率的氮合金，在游离氨中以1150℃(2100℉)的温度烧结；N2，高强度、中伸长率的氮合金，在游离氨中以1290℃(2350℉)的温度烧结；L，低碳，较低强度和最高伸长率，在部分真空中以1290℃(2350℉)的温度烧结、冷却，以防止氮吸附；HT，马氏体牌号，在游离氨中以1150℃(2100℉)的温度烧结，达最高强度；②词尾数字代表最小屈服强度，以 ksi 为单位。③词尾数字代表最小抗拉强度，以 ksi 为单位。④经热处理，材料的屈服强度和抗拉强度几乎一样。⑤或为55HRC的基体(换算的)硬度。

引自：MPIF 标准35，1997年版。

表2.7-27 铁、碳、氮、氧和密度对在中性NaCl溶液中的烧结奥氏体不锈钢的耐腐蚀性的影响

工艺变量	问题的起因	对耐腐蚀性的影响	建议对策
铁	在粉末或零件的生产设施里，含有铁的预合金粉末或铁基粉末受到的污染	由于电蚀作用，降低其耐腐蚀性超过99%	对粉末和零件的生产设施进行彻底的清洁，最好将专用设备与设施进行隔离
碳	不适当的脱油脂，烧结气氛被碳化；烧结炉里的油烟；高碳粉末	降低耐晶间腐蚀的能力	使用低牌号的不锈钢粉末，确保应用适当的脱润滑剂的方法(烧结之前)。使用干净的无油烟烧结炉和无碳烧结气氛；奥氏体烧结零件的 $w(C)$ 应当≤0.03%，铁素体的甚至更低
氮	在游离 NH_3 或其他含氮气氛中烧结，并结合缓慢冷却	降低耐晶间腐蚀的能力	降低烧结气氛中的氮百分比。使用>150～200℃/min(270～360℉/min)的快速冷却通过其临界温度范围(700～1000℃或1290～1830℉)。使用较高的烧结温度。在炉内冷却区使用中等的露点(-37～-45℃或-35～-50℉)。使用锡-改性不锈钢粉末

（续）

工艺变量	问题的起因	对耐腐蚀性的影响	建议对策
氧	粉末含过量氧，过高的烧结气氛露点，烧结后的缓慢冷却	降低耐一般性腐蚀的能力	使用低含氧量的粉末，最好＜2000ppm。控制烧结炉内的露点确保还原状态。最好使用＞200℃/min（360℉/min）的快速冷却。对于含氮气氛在冷却区使用露点（－37～－45℃或－35～－50℉）。对于在 H_2 中烧结，保证气氛里的水蒸气含量能低于50ppm
烧结零件的密度	高烧结密度	降低耐裂隙腐蚀的能力	避免在大约6.7～7.4g/cm³范围里的密度，或在这个密度范围里充满孔隙。在酸性介质里由于特定表面积的减少，其耐腐蚀性随密度的增加而得到改善

高密度P/M不锈钢

全密度不锈钢主要通过是热等静压压制（HIP），冷等静压压制（CIP）加上挤压和金属注射成形（MIM）而制造的。用这种技术生产的零件的力学性能和耐腐蚀性一般同与之相对应的传统锻压零件的很相似。热等静压压制零件包括用双相不锈钢制造的法兰、管接头、阀体和泵件，应用于外海用途。冷等静压压制和挤压的奥氏体不锈钢无缝管材也应用于海洋用途。

金属注射成形技术应用于形状复杂的高强度的用途上。大多数常用模注的不锈钢粉末包括奥氏体、双相和析出硬化牌号。表2.7-28和表2.7-29列出了经标准化的模注不锈钢的成分和性能。模注不锈钢的用途包括牙科支架器件、光盘驱动件、点火撞针、用于加工电话线端子连接件的弯曲/切削工具的刀片，以及有关的汽车零件。

表2.7-28 标准（MPIF）模注不锈钢的成分

MPIF牌号	成分①（质量分数，%）							
	Fe	Ni	Cr	Mo	C	Cu	Nb＋Ta	其他②
MIM-316L	余量	10.0～14.0	16.0～18.0	2.0～3.0	0.03	—	—	2.0
MIM-双相（316L）	余量	7.5～8.5	19.0～21.0	1.5～2.5	0.03	—	—	2.0
MIM-17-4PH	余量	3.0～5.0	15.5～17.5	—	0.07	3.0～5.0	0.15～0.45	2.0

①单一数值的均为最大值，除非另有说明。 ②标准对其他元素不作规定。
引自MPIF标准35《金属注射成形零件的材料标准》（1993—1994版）。

表2.7-29 标准（MPIF）模注不锈钢的最低和典型性能

材料牌号/状态	最低值					典型值						
	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率（%）	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率（%）	密度/(g/cm³)	表观硬度
	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi			
MIM-316L，烧结后	448	65	138	20	40	517	75	172	25	50	7.6	67HRB
MIM-双相，烧结后	469	68	179	26	33	538	78	228	33	43	7.6	84 HRB
MIM-17-4PH，烧结后	793	115	648	94	4	896	130	731	106	6	7.5	27 HRC
MIM-17-4PH，固溶处理并时效	1069	155	965	140	4	1186	172	1089	158	6	7.5	33 HRC

注：MIM，金属注射成形。
引自MPIF标准35《金属注射成形零件的材料标准》（1993—1994版）。

精选参考文献

- E. Klar, Corrosion of Powder Metallurgy Materials, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 823–847.
- E. Klar, P/M Stainless Steels, *Powder Metallurgy*, Vol 7, *ASM Handbook*, ASM International, to be published in 1998.
- E. Klar and P.K. Samal, Powder Metals, *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation*, R. Baboian, Ed., ASTM, 1995, p 551–557.
- E. Klar and P.K. Samal, Sintering of Stainless Steel, *Powder Metallurgy*, Vol 7, *ASM Handbook*, ASM International, to be published in 1998.
- E. Klar, M. Svilar, C. Lall, and H. Tews, Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steels Sintered in Commercial Furnaces, *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Vol 5, Metal Powder Industries Federation, 1992, p 411–426.

第8章 超 合 金

Matthew J. Donachie
夏福，伦斯勒 **Stephen J. Donachie** *特种金属公司*

有关超合金更详细的内容读者可参考《ASM特种手册》耐热材料(特别见219～344页)。其他有关内容则可查阅本章末所列的精选参考文献。

超合金就是镍-基、铁-镍-基以及钴-基合金，一般应用于约540℃(1000℉)以上的温度里。它们具有面心立方(fcc，奥氏体的)组织。铁、钴和镍在元素周期表里都属于位置相连的过渡金属。铁-镍-基超合金是一种不锈钢技术的延伸，并且一般是锻压的，而钴-基和镍-基超合金是锻压或铸造的，取决于其应用/成分。

所有成分适当的超合金活性金属都能锻、轧成薄板，或成形为各种形状。较高的合金成分通常都以铸件进行生产。还可用焊接或钎焊构建各种组合结构，但是许多含有大量硬化相的高合金成分很难焊接。

通过成分调整和工艺(包括热处理)可以控制其性能，在精加工产品中可以获得极佳的高温强度。图2.8-1比较了三类合金的应力断裂特性。

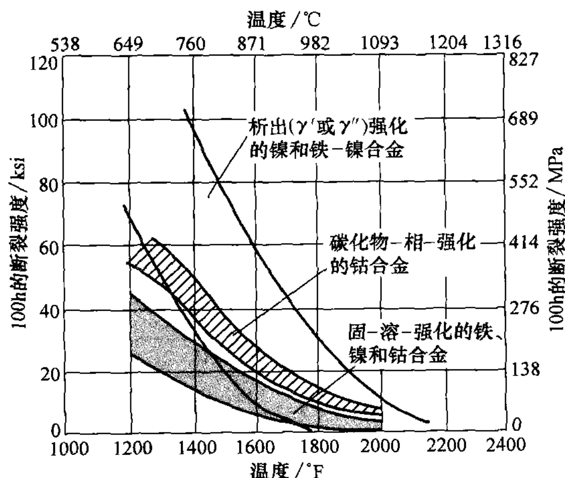


图2.8-1 超合金的一般性断裂特性

一般背景

重要的金属特征

纯铁的密度为$7.87g/cm^3$($0.284lb/in^3$)，纯镍和钴的密度约为$8.9g/cm^3$($0.322lb/in^3$)。铁-镍-基超合金的密度约为$7.9\sim8.3g/cm^3$($0.285\sim0.300lb/in^3$)，钴-基超合金约为$8.3\sim9.4g/cm^3$($0.300\sim0.340lb/in^3$)，镍-基超合金约为$7.8\sim8.9g/cm^3$($0.282\sim0.322lb/in^3$)。超合金密度受所加合金的影响：铝、钛和铬使密度减小，而钨、铼和钽使之增加。超合金的耐腐蚀性主要取决于所加的合金元素和经历的介质。

各纯净元素的熔点为：镍，1453℃(2647℉)；钴，1495℃(2723℉)；铁，1537℃(2798℉)。超合金的起始熔化温度及其熔化范围取决于成分和初期加工工艺。一般来说，钴-基的起始熔化温度高于镍-基或铁-镍-基超合金的。镍-基超合金的起始熔化温度低至1204℃(2200℉)。新型镍-基单晶体超合金含有有限量的熔点抑制剂，因此使其起始熔化温度等于或超过钴-基合金的。

铁和钴都能经历同素异形的转变并成为高温下的fcc，另一方面，镍在所有的温度下均为fcc。在以铁和钴为基础的超合金里，这些元素的fcc形式一般借助于合金的加入取得稳定。超合金的使用极限并不受制于同素异形转变反应的发生，倒是取决于初始熔化的温度和强化相的熔化。在钴-基超合金中，偶尔也有发生从fcc相朝稳定的较低温度相转变的倾向。超合金的奥氏体fcc基体具有对某些合金的加入的持续溶解度、极佳的塑性，以及因析出独特功效强化相(铁-镍-基、镍-基超合金)的有效特征。

超合金的弹性模量一般大约为207GPa(30×10^6psi)，尽管在室温里某些特定多晶体合金的模量可以根据其合金体系在172～241GPa[($25\sim35$)$\times10^6psi$]之间变化。经过使之成为方向性晶粒或具有晶体方位的处理，根据晶粒或晶体的方位与测试方向之间的关系，其模量约为124～310GPa[($18\sim45$)$\times10^6psi$]之间。与其他金属体系相比，其物理性质(电导率、热传导率和热膨胀性)趋于减小。这些性质受活性金属(过渡元素)的特性和是否加入过难熔金属的影响。

超合金塑性较好，虽然钴-基超合金的塑性一般不如铁-镍-基和镍-基超合金的。铁-镍-基和镍-基超合金

容易挤压、锻压或轧制成形，一般合金只有在铸造状态下才会有较高的强度。热变形是首选的成形工艺，冷成形通常仅限于薄形截面（薄板）。冷轧可用于提高短时强度的性能，即在本节一开始为超合金所设定的540℃（1000℉）温度以下的较低温度用途里的性能。

超合金的相和组织

超合金由奥氏体fcc基体相γ再加上各种不同的二次相所构成。对于性能有控制价值的二次相就是在所有各种类型的超合金中的碳化物，如：MC、$M_{23}C_6$、M_6C和M_7C_3（稀少）；以及在镍-基和铁-镍-基超合金中的一些金属间化合物如：具有γ'fcc顺序的$Ni_3(Al、Ti)$、具有γ''bct（球心四方晶形）顺序的Ni_3Nb、具有η六方晶形顺序的Ni_3Ti和具有正交晶形的Ni_3Nb。超合金是从固溶硬化剂和析出相里获得其强度的。主要的强化析出相为γ'和γ''。碳化物可直接提供有限的强化（如通过弥散硬化）或更为常见的间接强化（如利用稳定晶界以应对过度的剪切）。δ和η相对于在加工过程中（同γ'一起）控制锻压合金的组织是很有用的。在直接强化中，它们所能发挥作用的程度则取决于合金及其工艺。

除了这些能产生固溶硬化和/或促成碳化物和γ'形成的元素以外，其他元素（如硼、锆和铪）的加入也可增强其力学和化学性能。有些碳化物和γ'的生成元素也可显著有助于提高化学性能。表2.8-1和表2.8-2分别列出了一般性合金元素范围及其在超合金中的效用。有代表性超合金的典型有效显微组织如图2.8-2所示。

表2.8-1 超合金中的主要合金元素的普通添加范围

元　素	添加范围（质量分数，%）	
	Fe-Ni-和Ni-基	Co-基
Cr	5～25	19～30
Mo、W	0～12	0～11
Al	0～6	0～4.5
Ti	0～6	0～4
Co	0～20	—
Ni	—	0～22
Nb	0～5	0～4
Ta	0～12	0～9
Re	0～6	0～2

表2.8-2 超合金中合金元素的作用

效　用①		铁-基	钴-基	镍-基
固溶强化剂		Cr，Mo	Nb，Cr，Mo，Ni，W，Ta	Co，Cr，Fe，Mo，W，Ta，Re
fcc基体稳定剂		C，W，Ni	Ni	—
碳化物的形式	MC	Ti	Ti	W，Ta，Ti，Mo，Nb，Hf
	M_7C_3	—	Cr	Cr
	$M_{23}C_6$	Cr	Cr	Cr，Mo，W
	M_6C	Mo	Mo，W	Mo，W，Nb
碳氮化合物：M(CN)		C，N	C，N	C，N
促使碳化物的一般析出		P	—	—
形成γ'$Ni_3(Al,Ti)$		Al，Ni，Ti	—	Al，Ti
延缓六方η(Ni31i)形成		Al，Zr	—	—
提高γ'的溶线温度		—	—	Co
硬化析出和/或金属间化合物		Al，Ti，Nb	Al，Mo，Ti②，W，Ta	Al，Ti，Nb
抗氧化		Cr	Al，Cr	Al，Cr，Y，La，Ce
提高耐热腐蚀性		La，Y	La，Y，Th	La，Th
耐硫化性		Cr	Cr	Cr，Co，Si
提高蠕变性能		B	—	B，Ta
提高断裂强度		B	B，Zr	B③
晶界细化剂		—	—	B，C，Zr，Hf
有利于变形加工		—	Ni_3Ti	—
延缓γ'粗大化		—	—	Re

①对于给定的合金，不是一定要有全部这些效用。 ②如有足够的镍存在，也会通过Ni3Ti的析出产生硬化。 ③如存在的量大，则生成硼化物。

摘自：参考文献[1]。

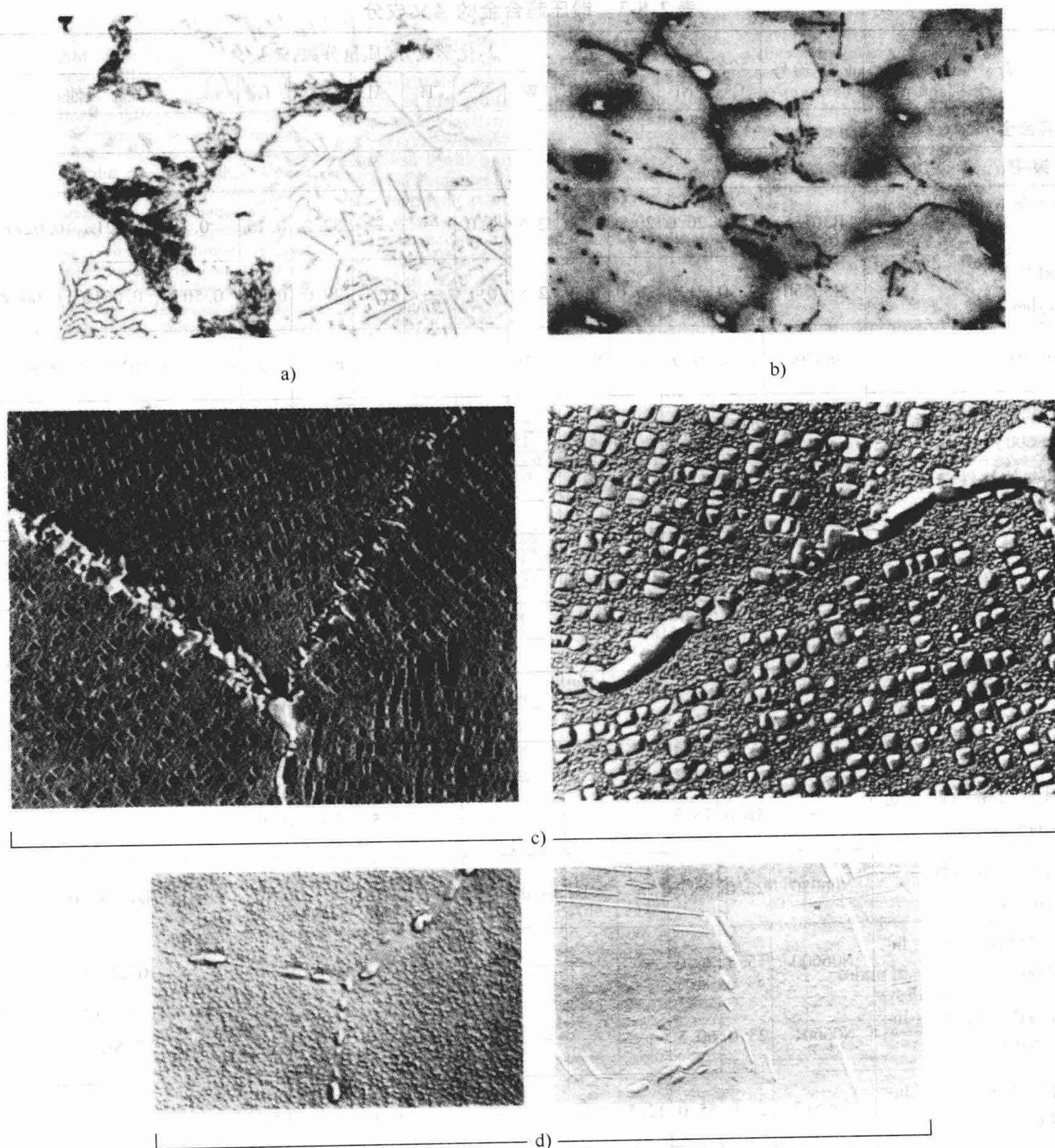


图2.8-2 有代表性超合金的典型有效显微组织。注意在a)和b)中的笔迹样的碳化物以及a)中的共晶碳化物-钴晶界组织，在c)中的球状和立方形γ'以及晶界碳化物，在d)中的球状γ'以及晶界碳化物或晶界和晶体内δ相。在d)(右)中的γ"并不明显，但确实存在

超合金系统

三种类型的超合金——铁-镍-基、镍-基和钴-基——还可进一步分为铸造和锻造的子类。迄今已发明和研究了大量的合金，很多已取得专利。然而多年来有许多的合金被淘汰，只有一些在延续使用。合金的用途取决于工业的需要(如燃气轮机、蒸汽轮机)，此处无法对所有的合金逐一进行介绍，仅用一些较新和较旧的合金为例，借以说明超合金系统的物理冶金特性。表2.8-3和表2.8-4所列的都是在美国开发的一些有代表性的超合金，并着重于它们的合金成分。

表 2.8-3　锻压超合金的名义成分

合　金	UNS 编号	化学成分(质量分数,%)										
		Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	其　他
固溶合金												
铁-镍-基												
合金 N-155 (Multimet)	R30155	21.0	20.0	20.0	3.00	2.5	1.0	—	—	32.2	0.15	0.15N, 0.2La, 0.02Zr
耐热钴铬钨镍合金 (Hayhes 556)	R30556	22.0	21.0	20.0	3.0	2.5	0.1	—	0.3	29.0	0.10	0.50Ta, 0.02La, 0.002Zr
19-9DL	S63198	19.0	9.0	—	1.25	1.25	0.4	0.3	—	66.8	0.30	1.10Mn, 0.60Si
耐热镍铬铁合金 (Incoloy 800)	N08800	21.0	32.5	—	—	—	—	0.38	0.38	45.7	0.05	—
耐热镍铬铁合金 (Incoloy 800H)	N08810	21.0	33.0	—	—	—	—	—	—	45.8	0.08	—
耐热镍铬铁合金 (Incoloy 800HT)	N08811	21.0	32.5	—	—	—	—	0.4	0.4	46.0	0.08	0.8Mn, 0.5Si, 0.4Cu
耐热镍铬铁合金 (Incoloy 801)	N08801	20.5	32.0	—	—	—	—	1.13	—	46.3	0.05	—
耐热镍铬铁合金 (Incoloy 802)	—	21.0	32.5	—	—	—	—	0.75	0.58	44.8	0.35	—
镍-基												
耐热钴铬钨镍合金 (Hayhes 214)	—	16.0	76.5	—	—	—	—	—	4.5	3.0	0.03	—
耐热钴铬钨镍合金 (Hayhes 230)	N06230	22.0	55.0	5.0 最高	2.0	14.0	—	—	0.35	3.0 最高	0.10	0.015 最高 B, 0.02La
耐热铬镍铁合金 (Inconel 600)	N06600	15.5	76.0	—	—	—	—	—	—	8.0	0.08	0.25Cu
耐热铬镍铁合金 (Inconel 601)	N06601	23.0	60.5	—	—	—	—	—	1.35	14.1	0.05	0.5Cu
耐热铬镍铁合金 (Inconel 617)	N06617	22.0	55.0	12.5	9.0	—	—	—	1.0	—	0.07	—
耐热铬镍铁合金 (Inconel 625)	N06625	21.5	61.0	—	9.0	—	3.6	0.2	0.2	2.5	0.05	—
RA333	N06333	25.0	45.0	3.0	3.0	3.0	—	—	—	18.0	0.05	—
耐热镍基合金 (Hastelloy B)	N10001	1.0 最高	63.0	2.5 最高	28.0	—	—	—	—	5.0	0.05 最高	0.03V
耐热镍基合金 (Hastelloy N)	N10003	7.0	72.0	—	16.0	—	—	0.5 最高	—	5.0 最高	0.06	—
耐热镍基合金 (Hastelloy S)	N06635	15.5	67.0	—	15.5	—	—	—	0.2	1.0	0.02 最高	0.02La

（续）

合 金	UNS 编号	化学成分(质量分数,%)										
		Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	其 他
固溶合金												
镍-基												
耐热镍基合金(Hastelloy W)	N10004	5.0	61.0	2.5 最高	24.5	—	—	—	—	5.5	0.12 最高	0.6V
耐热镍基合金(Hastelloy X)	N06002	22.0	49.0	1.5 最高	9.0	0.6	—	—	2.0	15.8	0.15	—
耐热镍基合金(Hastelloy C-276)	N10276	15.5	59.0	—	16.0	3.7	—	—	—	5.0	0.02 最高	—
耐热钴铬钨镍合金(Hayhes HR-120)	N08120	25.0	37.0	3.0	2.5	2.5	0.7	—	0.1	33.0	0.05	0.7Mn, 0.6Si, 0.2N, 0.004B
耐热钴铬钨镍合金(Hayhes HR-160)	N12160	28.0	37.0	29.0	—	—	—	—	—	2.0	0.05	2.75Si, 0.5Mn
耐热镍铬钛合金(Nimonic 75)	N06075	19.5	75.0	—	—	—	—	0.4	0.15	2.5	0.12	0.25 最高 Cu
耐热镍铬钛合金(Nimonic 86)	—	25.0	65.0	—	10.0	—	—	—	—	—	0.05	0.03Ce, 0.015Mg
钴-基												
耐热钴铬钨镍合金(Hayhes 25(L605))	R30605	20.0	10.0	50.0	—	15.0	—	—	—	3.0	0.10	1.5Mn
耐热钴铬钨镍合金(Hayhes 188)	R30188	22.0	22.0	37.0	—	14.5	—	—	—	3.0 最高	0.10	0.90La
合金 S-816	R30816	20.0	20.0	42.0	4.0	4.0	4.0	—	—	4.0	0.38	—
MP35-N	R30035	20.0	35.0	35.0	10.0	—	—	—	—	—	—	—
MP159	R30159	19.0	25.0	36.0	7.0	—	0.6	3.0	0.2	9.0	—	—
钨铬钴合金(Stellite B)	N07718	30.0	1.0	61.5	—	4.5	—	—	—	1.0	1.0	—
UMCo-50	—	28.0	—	49.0	—	—	—	—	—	21.0	0.12	—
析出硬化合金												
铁-镍-基												
A-286	S66286	15.0	26.0	—	1.25	—	—	2.0	0.2	55.2	0.04	0.005B, 0.3V
透平叶片用铬钼钛合金钢(Discaloy)	S66220	14.0	26.0	—	3.0	—	—	1.7	0.25	55.0	0.06	—
耐热镍铬铁合金(Incoloy 903)	N19903	0.1 最高	38.0	15.0	0.1	—	3.0	1.4	0.7	41.0	0.04	—
耐热镍基(Pyromet CTX-1)	—	0.1 最高	37.7	16.0	0.1	—	3.0	1.7	1.0	39.0	0.03	—
耐热镍铬铁合金(Incoloy 907)	N19907	—	38.4	13.0	—	—	4.7	1.5	0.03	42.0	0.01	0.15Si
耐热镍铬铁合金(Incoloy 909)	N19909	—	38.0	13.0	—	—	4.7	1.5	0.03	42.0	0.01	0.4Si

（续）

合金	UNS 编号	化学成分（质量分数，%）										
		Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	其他
析出硬化合金												
铁-镍-基												
耐热镍铬铁合金（Incoloy 925）	N09925	20.5	44.0	—	2.8	—	—	2.1	0.2	29	0.01	1.8Cu
V-57	—	14.8	27.0	—	1.25	—	—	3.0	0.25	48.6	0.08 最高	0.01B，0.5 最高 V
W-545	S66545	13.5	26.0	—	1.5	—	—	2.85	0.2	55.8	0.08 最高	0.05B
镍-基												
超耐热镍合金（Astroloy）	N13017	15.0	56.5	15.0	5.25	—	—	3.5	4.4	<0.3	0.06	0.03B，0.06Zr
Custom Age 625 PLUS	N07716	21.0	61.0	—	8.0	—	3.4	1.3	0.2	5.0	0.01	—
耐热钴铬钨镍合金（Haynes 242）	—	8.0	62.5	2.5 最高	25.0	—	—	—	0.5 最高	2.0 最高	0.10 最高	0.006 最高 B
耐热钴铬钨镍合金（Haynes 263）	N07263	20.0	52.0	—	6.0	—	—	2.4	0.6	0.7	0.06	0.6Mn，0.4Si，0.2Cu
耐热钴铬钨镍合金（Haynes R-41）	N07041	19.0	52.0	11.0	10.0	—	—	3.1	1.5	5.0	0.09	0.5SI，0.1Mn，0.006B
耐热铬镍铁合金（Inconel 100）	N13100	10.0	60.0	15.0	3.0	—	—	4.7	5.5	<0.6	0.15	1.0V，0.06Zr，0.015B
耐热铬镍铁合金（Inconel 102）	N06102	15.0	67.0	—	2.9	3.0	2.9	0.5	0.5	7.0	0.06	0.005B，0.02Mg，0.03Zr
耐热镍铬铁合金（Incoloy 901）	N09901	12.5	42.5	—	6.0	—	—	2.7	—	36.2	0.10 最高	—
耐热铬镍铁合金（Inconel 702）	N07702	15.5	79.5	—	—	—	—	0.6	3.2	1.0	0.05	0.5Mn，0.2Cu，0.4Si
耐热铬镍铁合金（Inconel 706）	N09706	16.0	41.5	—	—	—	—	1.75	0.2	37.5	0.03	2.9（Nb+Ta），0.15 最高 Cu
耐热铬镍铁合金（Inconel 718）	N07718	19.0	52.5	—	3.0	—	5.1	0.9	0.5	18.5	0.08 最高	0.15 最高 Cu
耐热铬镍铁合金（Inconel 721）	N07721	16.0	71.0	—	—	—	—	3.0	—	6.5	0.04	2.2Mn，0.1Cu
耐热铬镍铁合金（Inconel 722）	N07722	15.5	75.0	—	—	—	—	2.4	0.7	7.0	0.04	0.5Mn，0.2Cu，0.4Si
耐热铬镍铁合金（Inconel 725）	N07725	21.0	57.0	—	8.0	—	3.5	1.5	0.35 最高	9.0	0.03 最高	—
耐热铬镍铁合金（Inconel 751）	N07751	15.5	72.5	—	—	—	1.0	2.3	1.2	7.0	0.05	0.25 最高 Cu
耐热铬镍铁合金（Inconel X-750）	N07750	15.5	73.0	—	—	—	1.0	2.5	0.7	7.0	0.04	0.25 最高 Cu

(续)

合金	UNS 编号	化学成分(质量分数,%)										
		Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	其他
析出硬化合金												
镍-基												
M-252	N07252	19.0	56.5	10.0	10.0	—	—	2.6	1.0	<0.75	0.15	0.005B
耐热镍铬钛合金(Nimonic 80A)	N07080	19.5	73.0	1.0	—	—	—	2.25	1.4	1.5	0.05	0.10 最高 Cu
耐热镍铬钛合金(Nimonic 90)	N07090	19.5	55.5	18.0	—	—	—	2.4	1.4	1.5	0.06	—
耐热镍铬钛合金(Nimonic 95)	—	19.5	53.5	18.0	—	—	—	2.9	2.0	5.0 最高	0.15 最高	+B, +Zr
耐热镍铬钛合金(Nimonic 100)	—	11.0	56.0	20.0	5.0	—	—	1.5	5.0	2.0 最高	0.30 最高	+B, +Zr
耐热镍铬钛合金(Nimonic 105)	—	15.0	54.0	20.0	5.0	—	—	1.2	4.7	—	0.08	0.005B
耐热镍铬钛合金(Nimonic 115)	—	15.0	55.0	15.0	4.0	—	—	4.0	5.0	1.0	0.20	0.04Zr
C-263	N07263	20.0	51.0	20.0	5.9	—	—	2.1	0.45	0.7 最高	0.06	—
耐热镍基(Pyromet 860)	—	13.0	44.0	4.0	6.0	—	—	3.0	1.0	28.9	0.05	0.01B
耐热镍基(Pyromet 31)	N07031	22.7	55.5	—	2.0	—	1.1	2.5	1.5	14.5	0.04	0.005B
耐热镍基合金(Refractoloy 26)	—	18.0	38.0	20.0	3.2	—	—	2.6	0.2	16.0	0.03	0.015B
René 41	N07041	19.0	55.0	11.0	10.0	—	—	3.1	1.5	<0.3	0.09	0.01B
René 95	—	14.0	61.0	8.0	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	<0.3	0.16	0.01B, 0.05Zr
René 100	—	9.5	61.0	15.0	3.0	—	—	4.2	5.5	1.0 最高	0.16	0.015B, 0.06Zr, 1.0V
耐热镍基合金(Udimet 500)	N07500	19.0	48.0	19.0	4.0	—	—	3.0	3.0	4.0 最高	0.08	0.005B
耐热镍基合金(Udimet 520)	—	19.0	57.0	12.0	6.0	1.0	—	3.0	2.0	—	0.08	0.005B
耐热镍基合金(Udimet 630)	—	17.0	50.0	—	3.0	3.0	6.5	1.0	0.7	18.0	0.04	0.004B
耐热镍基合金(Udimet 700)	—	15.0	53.0	18.5	5.0	—	—	3.4	4.3	<1.0	0.07	0.03B
耐热镍基合金(Udimet 710)	—	18.0	55.0	14.8	3.0	1.5	—	5.0	2.5	—	0.07	0.01B
UnitempAF2-1DA	N07012	12.0	59.0	10.0	3.0	6.0	—	3.0	4.6	<0.5	0.35	1.5Ta, 0.015B, 0.1Zr
耐高热镍基合金(Waspaloy)	N07001	19.5	57.0	13.5	4.3	—	—	3.0	1.4	2.0 最高	0.07	0.006B, 0.09Zr

表 2.8-4　铸造超合金的名义成分

合金代号	名义成分(质量分数,%)											
	C	Ni	Cr	Co	Mo	Fe	Al	B	Ti	Ta	W	Zr	其　他
镍基													
B-1900	0.1	64	8	10	6	—	6	0.015	1	4[①]	—	0.10	—
CMSX-2	—	66.2	8	4.6	0.6	—	56	—	1	6	8	6	—
耐热镍基合金(Hastelloy X)	0.1	50	21	1	9	18	—	—	—	—	1	—	—
耐热铬镍铁合金(Inconel 100)	0.18	60.5	10	15	3	—	5.5	0.01	5	—	—	0.06	1V
耐热铬镍铁合金(Inconel 713C)	0.12	74	12.5	—	4.2	—	6	0.012	0.8	1.75	—	0.1	0.9Nb
耐热铬镍铁合金(Inconel 713LC)	0.05	75	12	—	4.5	—	6	0.01	0.6	4	—	0.1	—
耐热铬镍铁合金(Inconel 738)	0.17	61.5	16	8.5	1.75	—	3.4	0.01	3.4	—	2.6	0.1	2Nb
耐热铬镍铁合金(Inconel 792)	0.2	60	13	9	2.0	—	3.2	0.02	4.2	—	4	0.1	2Nb
耐热铬镍铁合金(Inconel 718)	0.04	53	19	—	3	18	0.5	—	0.9	—	—	—	0.1Cu, 5Nb
X-750	0.04	73	15	—	—	7	0.7	—	2.5	—	—	—	0.25Cu, 0.9Nb
M-252	0.15	56	20	10	10	—	1	0.005	2.6	—	—	—	—
MAR-M200	0.15	59	9	10	—	1	5	0.015	2	—	12.5	0.05	1Nb[②]
MAR-M246	0.15	60	9	10	2.5	—	5.5	0.015	1.5	1.5	10	0.05	—
MAR-M247	0.15	59	8.25	10	0.7	0.5	5.5	0.015	1	3	10	0.05	1.5Hf
PWA 1480	—	余量	10	5.0	—	—	5.0	—	1.5	12	4.0	—	—
René 41	0.09	55	19	11.0	10.0	—	1.5	0.01	3.1	—	—	—	—
René 77	0.07	58	15	15	4.2	—	4.3	0.015	3.3	—	—	0.04	—
René 80	0.17	60	14	9.5	4	—	3	0.015	5	—	4	0.03	—
René 80Hf	0.08	60	14	9.5	4	—	3	0.015	4.8	—	4	0.02	0.75Hf
René 100	0.18	61	9.5	15	3	—	5.5	0.015	4.2	—	—	0.06	1V
René N4	0.06	62	9.8	7.5	1.5	—	4.2	0.004	3.5	4.8	6	—	0.5Nb, 0.15Hf
耐热镍基合金(Udimet 500)	0.1	53	18	17	4	2	3	—	3	—	—	—	—
耐热镍基合金(Udimet 700)	0.1	53.5	15	18.5	5.25	—	4.25	0.03	3.5	—	—	—	—
耐热镍基合金(Udimet 710)	0.13	55	18	15	3	—	2.5	—	5	—	1.5	0.08	—
Waspaloy	0.07	57.5	19.5	13.5	4.2	1	1.2	0.005	3	—	—	0.09	—
WAX-20(DS)	0.20	72	—	—	—	—	6.5	—	—	—	20	1.5	—

（续）

合金代号	名义成分（质量分数，%）												
	C	Ni	Cr	Co	Mo	Fe	Al	B	Ti	Ta	W	Zr	其他
钴基													
AiResist 13	0.45	—	21	62	—	—	3.4	—	—	2	11	—	0.1Y
AiResist 213	0.20	0.5	20	64	—	0.5	3.5	—	—	6.5	4.5	0.1	0.1Y
AiResist 215	0.35	0.5	19	63	—	0.5	4.3	—	—	7.5	4.5	0.1	0.1Y
FSX414	0.25	10	29	52.5	—	1	—	0.010	—	—	7.5	—	—
耐热钴铬钨镍合金（Haynes 21）	0.25	3	27	64	—	1	—	—	—	—	—	—	5Mo
耐热钴铬钨镍合金（Haynes 25；L-605）	0.1	10	20	54	—	1	—	—	—	—	15	—	—
J-1650	0.20	27	19	36	—	—	—	0.02	3.8	2	12	—	—
MAR-M 302	0.85	—	21.5	58	—	0.5	—	0.005	—	9	10	0.2	—
MAR-M 322	1.0	—	21.5	60.5	—	0.5	—	—	0.75	4.5	9	2	—
MAR-M 509	0.6	10	23.5	54.5	—	—	—	—	0.2	3.5	7	0.5	—
MAR-M918	0.05	20	20	52	—	—	—	—	—	7.5	—	0.1	—
NASA Co-W-Re	0.40	—	3	67.5	—	—	—	—	1	—	25	1	2Re
S-816	0.4	20	20	42	—	4	—	—	—	—	4	—	4Mo，4Nb，1.2Mn，0.4Si
V-36	0.27	20	25	42	—	3	—	—	—	—	2	—	4Mo，2Nb，1Mn，0.4Si
WI-52	0.45	—	21	63.5	—	2	—	—	—	—	11	—	2Nb + Ta
X40（钨铬钴合金，Stellite alloy 31）	0.50	10	22	57.5	—	1.5	—	—	—	—	7.5	—	0.5Mn，05Si

①B - 1900 + Hf 也含有 1.5% Hf。 ②MAR - M200 + Hf 也含有 1.5% Hf。

铁-镍-基。最重要的铁-镍-基超合金种类，包括那些通过从 fcc 基体里析出金属间化合物而得到强化的合金。而最普通的析出物为 γ'，以 A-286、V-57 或 Incoloy 901 为其代表。以 Incoloy（IN）718 为代表的一些合金析出物 γ''，其正式分类为铁-镍-基，但现在都看成为镍基。其他铁-镍-基超合金主要由通过固溶硬化进行强化的改进型不锈钢组成。最后一类合金的范围从 19-9DL（含有微量铬和镍调剂的、加入固溶硬化剂和较高含碳量的 18-8 不锈钢）到 Incoloy 800H（21 铬、高镍及加入少量的钛和铝，由此形成 γ'）不等。

镍基。最重要的镍-基超合金种类就是通过在 fcc 基体中析出金属间化合物而得到强化的合金。对于镍-钛/铝合金而言，强化析出物就是 γ'。这些合金就是以锻压合金 Waspaloy 和 Udimet（U）或以铸造合金 René 80 和 IN 713 为代表的。镍-铌合金的强化析出物为 γ''。这些合金都是以 IN 718 位代表的。有一些镍基合金可以同时含有铌加上钛和/或铝，并在强化中同时利用 γ' 和 γ'' 的析出物。这种型号的合金就是 IN 706和 IN 909。另一类镍-基超合金主要通过固溶强化。这种合金就是 Hastelloy X 和 IN 625。用固溶体强化的镍-基合金可以通过碳化物和/或金属间化合物的析出获得额外的强化。第三类包括氧化物弥散强化（ODS）合金，如 IN MA-754 和 IN MA-6000E，它们都通过一些像氧化钇的惰性颗粒的弥散而得到强化，连同一些 γ' 析出的情况（MA-6000E）。

镍-基超合金能以铸造和锻压的两种状态使用，尽管也常采用特殊工艺（粉末冶金/等温锻造）生产更高合金成分的锻压产品（René 95、Astroloy、IN 100）。现在，镍-基超合金的尺度参数另外还引入了晶粒的形状比和方位，用于作为控制其性能的方法。事实上在某些情况下，已把晶粒边界去除（见后面要讨论的熔模铸造）。ODS 类的锻压粉末冶金（P/M）合金和铸造合金如 MAR-M247，都能借助方向性的重结晶或固化来控制晶粒的形态，以此显示其性能的改善。

钴-基。钴-基超合金通过碳化物和固溶硬化剂的组合得到恒定的强化。这些合金的基本差别在于锻压和铸造组织之间。如以 X-40 为代表的铸造合金和以 L605 位代表的锻压合金。在钴-基系统里，还没有找到像镍-基或铁-镍-基的 γ′析出物一样功效程度的金属间化合物。

应用

超合金可以采用铸造、轧制、挤压、锻造和粉末加工等方法进行制造。薄板、棒料、板材、管材、轴类、机翼、盘料以及压力容器(罐)都是所生产的型材。这些金属材料已应用于飞机、工业和船用的汽轮机、核反应堆、飞机外壳、航天器的结构件、石化生产、矫形假肢和义齿以及环保的用途。虽然已经开发成功能用于高温的用途，但也有一些可以在低温和人体温度里使用。应用范围还在不断扩大，但其速度比几十年前要慢一些了。航天航空方面还保持突出的应用地位。

工艺

初始和二次熔化

有相当数量的超合金尤其是钴-基和铁-镍-基合金，都能以适用于不锈钢的不同方法在空气中熔化。但是，对于大部分的镍-基或铁-镍-基超合金还是要求以真空感应熔化(VIM)作为其基本的熔化工艺。

真空感应熔化(VIM)。使所要求的合金零件在高度真空度里熔化，再倒入铸锭或铸件熔模里进行浇铸。采用 VIM 可将填隙气体减少到很低的程度，并使之达得较高的铝、钛(以及还有其他相对活性的元素)的含量及其生产再现性，故此，因形成熔渣或铁屑而造成的污染也比在空气中熔化得更少。减少气体含量的好处以及控制铝和钛的能力如图 2.8-3 和图 2.8-4 所示。

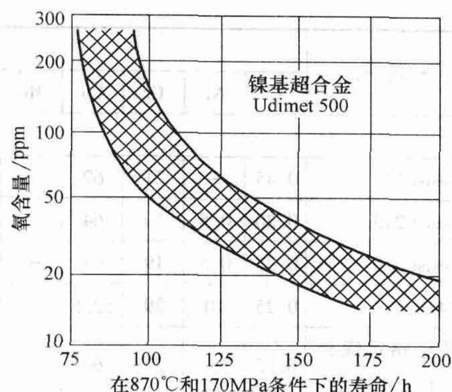


图 2.8-3 通过真空熔化而减少氧含量，使其断裂寿命在 870℃(1600℉)和 170MPa(25ksi)条件下得以改善

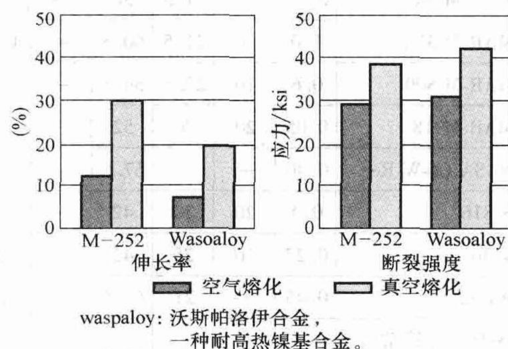


图 2.8-4 真空熔化对于两种镍基超合金的影响，同时对其成分进行有利的调整

所有的超合金都会在其凝固过程中发生偏析(在显微尺度上)。合金的凝固区域是由部分固体和部分液体构成的(即液体+固体区)。其凝固的模式一般呈枝晶状，并且其最早形成(即初生)的枝晶里所含的析出物形成元素(钛、铝、铌和碳)要低于其平均熔液中的成分。故在枝晶间区域中的这些溶质元素要相应地富集。当冷却速度变得缓慢(铸件尺寸增加)时，其初始枝晶和枝晶间的区域则会变得更大一些。熔液的冷却速度越慢且其合金含量越高，则枝晶间的区域也就越大。当达到某一点时，枝晶间的区域变得足够大以致相互连通并构成宏观缺陷。由于枝晶间熔液里经富集的溶质和熔液的名义成分之间在密度上的差异，在凝固组织中的这些区域变成由其自我维系的连续通道。对于低密度的枝晶间流体，这种通道缺陷是从凝固的前沿出发，并沿其垂直方向(但不是呈严格直角)生长；而对于高密度的枝晶间流体，则是朝着与凝固的前沿成横向(平行)的方向生长。

溶质富集通道缺陷因为在与它们的生长轴线相垂直的横截面上看，呈现为圆的、暗黑的和环形的斑点，故称之为“黑斑孔隙”。黑斑孔隙区会变成后续工艺无法去除的硬金属间化合物。这种金属间化合物在锻压合金中的存在，对于疲劳寿命极其有害。如果锻压合金生产所需要的大型铸锭是直接在静态下浇铸，那么不合格的溶质富集缺陷基本上是不可避免的。所以锻压生产的超合金一般要进行重熔(即二次熔化)，以此控制凝固组织。有三种二次熔化工艺可供采用：真空电弧重熔(VAR)、电渣重熔(ESR)和 ESR-VAR。

真空电弧重熔工艺。在直流(dc)系统里，用一

根铸造(一般为VIM)电极作为其阴极。在真空水冷熔炉里的电极和炉底之间激发电弧。电弧产生的热量以一种可控的速度熔化电极的端部表面。熔化的金属在熔炉里重新凝固，电极熔化速度由输入的电能控制。通过熔化/凝固参数，制约凝固前沿(熔池形状)的深度和角度。熔池形状的维持，能使不合格的溶质富集凝固组织不会产生。

除了建立一种可控的凝固组织外，VAR还能减少合金中的高蒸汽压元素的数量。如铋和铅之类元素(它们甚至在VIM之后还能以低浓度存在)的存在是决不允许的，利用VAR工艺可以将其减少到可以忽略的程度。镁可认为是提高加工性所需要的(而且是VIM中的添加元素)，其含有的浓度会降低，但是不会完全去除。高蒸汽压元素除外，VIM的化学性质也反映了VAR的化学性质。在VAR熔液表面的氧化物和氮化物浮渣能提高清洁度，并减少材料经VAR处理后的气体含量。

图2.8-5是用于说明VAR电极即固化铸锭与凝固前沿的深度和形状之间关系的示意图。在VAR中，挨着水冷熔炉首先凝固的金属有较低的溶质含量(溶质贫乏)。而在此凝固层的上面部分，则由熔池形成溅射并称之为“料顶(crown)”。在金属熔液前沿的向前推进支撑下，料顶熔化后留在铸锭的外围形成称为“料架(shelf)”的贫合金层。在其重熔的过程中，VIM电极上的残余氧化物/氮化物会覆盖在熔池的顶部并融入料架中。

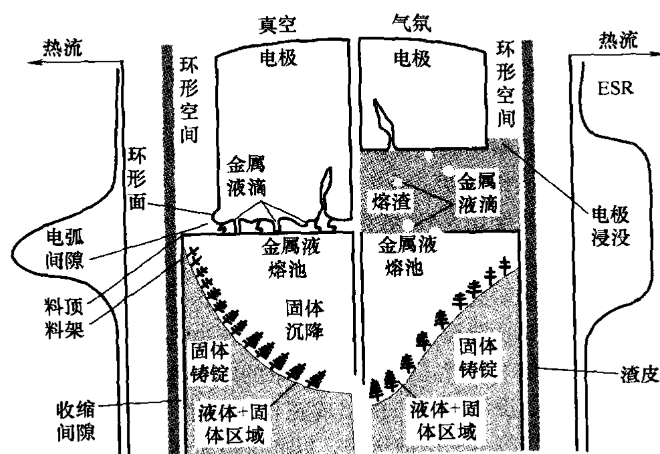


图2.8-5 VAR(左)和ESR(右)熔化工艺的凝固关系示意图。引自：参考文献[1]之后

VAR工艺的其他变量如图2.8-5所示，电极侧面与熔炉壁之间的距离为一环形空间。电极底面与熔池的顶面之间的距离为电弧间隙。随着铸锭的凝固，在铸锭与水冷熔炉之间会张开一个收缩间隙。对于偏析敏感的合金，常用氦气充入该收缩间隙，以此改善其热传递，并将熔池的深度减小到最小限度。如图2.8-5所示，VAR里排出的热量集中于靠近熔池的顶部。于是，真空电弧重熔就是一个有着低热惯性的过程，在过程中根据输入电能的变化发生非常快速的响应(熔池形状的改变)。

黑斑孔隙作为在二次熔化中发生的最严重缺陷却不是所能产生的惟一与熔化有关的缺陷。会有多种不同的原因造成溶质贫乏偏析。作为形成溶质贫乏偏析的最普通的机制就是料架的脱离(因电弧所致)，由此造成一种“脱落”的缺陷。落入熔池的料架块很可能没有完全熔化。其结果就是以料架的化学性质混入有缺陷的组织中，使之在里面含有氧化物/氮化物的细脉。这些溶质贫乏区常可以用零件/试验晶片的宏观浸蚀进行检测，即在深色的腐蚀基体上显现浅色腐蚀区域，故它们也被描述为“离散白色斑点”。

离散白色斑点也会通过电极疏松区的枝晶脱落而形成。如果电极开裂，则大于枝晶的碎块会落入熔液中。当由此形成一种浅色腐蚀缺陷时，其缺陷要比离散白色斑点的大，并且含有深色腐蚀区(残留的铸造组织)。这种组织常称之为“枝晶白色斑点”。虽然VAR技术和控制通过优化可以将离散白色斑点的生成频次降到最低限度，但由于电弧本身的不稳定性，离散白色斑点无法消除。采用经VAR处理的材料制成的零件在设计时必须对已确定的工艺或合金考虑过往白色斑点曾发生的频次。

要从两个不同的方面考虑VAR工艺的控制：熔池深度和形状的控制(凝固组织的控制)，电弧稳定性的控制(对脱落缺陷形成的控制)。通过调节热量的输入和排出可以进行熔池形状和深度的控制。热量的输入是用电极的熔化速度确定的。通过改变熔化电流常可以在非常短的时间内监测和修正熔化的速度(熔化率的控制)。或者，通过使电流保持恒定的控制(电流安培控制)，可以在整个熔化过程中维持适中的熔化速度。至于热量的排出取决于熔化铸锭的接触表面与体积之比(铸锭的大小)。铸锭较大，其热量的排出也较差(表面积与体积比也减小)，故必须按比例降低熔化的速度，以防止形成大的液体+固体区域及不允许产生的正向偏析。然而对于一定大小的铸锭，高速熔化会促使正向偏析，太慢的熔化速度会导致可见的溶质贫乏组织的生成。这种“凝固白色斑点”的形成机制还没有完全搞清楚。它

们不同于离散白色斑点，它们是一种凝固效应，而不是料架或电极的脱落，故也不会含有氧化物/氮化物的细脉。尽管如此，这些溶质贫乏区域还是有潜在的害处，在后续工序里它们会使控制晶粒的生长变得困难。

电弧稳定性的有效控制主要是通过在一根电极的整个熔化期间对电弧间隙的控制而进行的(对于给定的标准工艺而言，环形空间是一个固定的参数)。对于超合金的熔化，电弧间隙一般控制在6.4~12.7mm(0.25~0.5in)。为了保持电弧间隙的不变，电极要按照电压的波动或快或慢地(推杆驱动)插入熔液，然而电压的波动是由于电弧间隙变化造成系统电阻的改变而引发的。超合金的现代控制系统一般不再使用电压来控制电弧间隙，而是使用有关电压的测量：液滴短路频数(DSF)。一次液滴的短路就是瞬间下降的电压脉冲，它发生在熔融金属液滴同时接触电极和熔池的时候。在给定的时间间隔里，发生短路的次数是与电弧间隙成正比的(电弧间隙与DSF之间的关系是与熔化率有关的)。通过控制环形间隙和控制熔化的电极的特性可以对电弧稳定性进行被动式控制。用于VIM的电极一般含有疏松的和低品级的残余难熔材料，这两者都不利于电弧的稳定。所以，真空感应熔化和浇铸方法是保证VAR电弧稳定性和尽量减少液滴型缺陷形成的重要因素。

电渣重熔工艺。当将其应用于超合金时，在敞开气氛中，运行的交流(ac)系统中使用一根铸造(一般为VIM)电极作为其消耗元件。氟化物和氧化物的"炉渣"炉料也是其系统中一部分，借助电流的通过使其保持熔融状态。电极浸没在熔渣中，电极表面熔化成滴状，液滴经过熔渣后在水冷的熔炉里凝固(与VAR相似)。熔化的速度由输入的电能所控制。而热量的排出则取决于铸锭大小的选定。通过权衡熔化/凝固的各参数，就能够维持液体+固体区域的深度和角度，以此避免发生不合格的溶质富集凝固缺陷。

与VAR不同，ESR不能去除高蒸汽压的废渣元素，故而所保留下来的镁含量比其有可能在VAR中的更高(对热变形加工性产生有益的效用)。脱硫是一种有利的、与变形加工性有关的化学反应。活性元素(特别是钛和铝)会发生有害的成分变化，作为其变化是为了与炉渣中的一些组分达到化学平衡。

借助于ESR工艺能将混入熔化电极中的氧化物有效地去除，生产出的铸锭一般比VAR铸锭更为清洁。制约凝固后铸锭的组织原理与制约VAR铸锭凝固的是一样的，但是传递热量的特点(通过氧化皮)以及处于铸锭/熔池顶部的热容体(熔渣)的存在使得ESR组织与VAR的有根本的不同。

图2.8-5的示意图表明了ESR电极即固化的铸锭与熔池的深度、形状之间的关系。ESR凝固的一个主要特点就是氧化物的"皮"介于铸锭表面与熔炉壁之间。与VAR相似，电极侧面和熔炉壁之间的距离称为环形空间。炉渣熔池的深度是一个控制系统电阻的重要运行参数。电极浸没于熔渣中的深度是一个控制熔池形状的重要参数。如图2.8-5所示，ESR中热量排出的幅度远大于VAR的。由于铸锭渣皮的绝热特性，ESR中排出的热量肯定不如VAR有效。于是ESR是一种高热惯性的工艺，而且这种工艺因输入的电能变化而产生的响应(使熔池的形状改变)也迟缓。

铸锭渣皮的存在不仅能改善铸锭的表面质量，更重要的是还能免除溶质贫乏料架层在ESR铸锭上的存在(当源自电极上的氧化物颗粒融入炉渣时，它们不会聚集在铸锭的表面上)。因为ESR铸锭确实没有铸锭的料架，所以也根本不会由其脱落而形成(离散的)白色斑点，其白色斑点仍来源于ESR中脱落的电极。作为ESR产品，并不报告其凝固的白色斑点。然而，作为铸锭渣皮的一个后果就是ESR中的热量排出效率要小于VAR的。这一点可以从图2.8-5中两种工艺在熔池形状上的不同看出。ESR熔池趋向于更深和更V形化(与VAR的U形相比)。深熔池有助于黑斑孔隙的形成，它只能用减小铸锭的尺寸来解决。结果，能够生产的ESR铸锭最大尺寸(对于任何给定的合金系统)小于VAR的最大尺寸。

ESR工艺的控制要从两个不同的方面来考虑：控制熔池的深度、形状(凝固组织的控制)，形成令人满意的铸锭表皮。熔池的深度、形状主要受控于熔化的速度(电能的输入)。电渣重熔的过程中一般都要控制熔化的速度，即通过连续的电流调节保持一均匀的熔化速度。由于ESR工艺的高热惯性，ESR的熔化速度比VAR更为可变。保持电极均匀而又浅层地浸没在熔渣里将影响对熔池深度和形状的二次控制。金属熔滴通过熔渣的行程将影响熔渣的电阻率，以至造成系统运行电压的变动。由于这种变动，运行电压呈现为一带宽的数值。其带的宽度称为电压摆幅。电极的浸没与电压摆幅成正比，并由ESR的顶杆驱动装置将电极向前送进，以此维持所要求的摆幅值。

事实上，是无法通过熔化过程中的有效控制来产生令人满意的铸锭表皮，而应该依赖变量的选择。其中最重要的变量是熔化的速度、炉渣熔池的深度和炉渣成分的选用。较高的熔化速度能产生较好的铸锭表面。由于较高的熔化速度还会形成较深的熔池，但会使其过程更接近于黑斑孔隙形成的工况，因此参数的

正确权衡是选择的关键所在。

炉渣的成分是以 CaF_2 为基础的。CaO、MgO 和 Al_2O_3 的加入是为了改善炉渣的电阻及其熔点。所有工业纯度的 CaF_2 都含有 SiO_2。在含钛合金的熔化过程中，合金中的钛会与炉渣中的硅互换。炉渣会有 TiO_2 的富集化，而合金中的硅含量通常会在最初的几百磅的熔液范围内增加直至达到平衡。为了将这种互换降低到最低限度，一些工业上用的炉渣通过特意加入 TiO_2 而得以缓和。

ESR-VAR 的重熔工艺。VAR 与 ESR 工艺的比较表明 ESR 工艺具有生产清洁金属的固有能力，而 VAR 工艺具有生产较大型的铸锭并防止产生富缺陷合金的能力。燃气轮机的零件需要生产较大的锻件毛坯，为此开发出一种混合工艺——VIM-ESR-VAR（三重熔化）。在这种工艺中，ESR 工序为后续重熔生产一种清洁电极。这种经过改进的（与 VIM-VAR 相比）电极质量有利于在 VAR 工艺中的控制，以此进一步确保生产（在非常大的铸锭里）时不会产生富偏析合金的材料，并对所有尺寸大小的铸锭都能减少白色斑点出现的频数。

在一些先进的含有 γ' 高体积比例（V_f）的镍基超合金里，无论 VIM-VAR 还是 VIM-ESR 都无法为后续的热变形加工提供满意的铸锭组织。这种合金可以用 P/M 技术进行处理（见本章中“粉末加工工艺”一节）。

其他熔化工艺。电子束重熔/提炼（EBR）被评价为通过进一步减少杂质和大大降低铁渣/夹杂含量，并使镍基和铁-镍-基超合金的性能得到改善的又一种工艺。这种工艺有助于为铸造工序生产经改进的原材料和为锻压工艺提供更易于加工的初始铸锭。诸如 EBR 和氩氧脱碳（AOD）的二次熔化工艺的推广应用，取决于它们作为镍-基和铁-镍-基超合金的高级工艺方法所能达到经济实用的程度。

钴合金熔化。钴-基超合金一般并不要求复杂的真空处理。通常都使用空气感应熔化（AIM），也可以使用 VIM 和 ESR，后者用于生产后续要进行形变加工的毛坯。含有铝或钛（J-1570）和钽或锆（MAR-M302 和 MAR-M509）的合金必须用 VIM 熔化。其他钴-基超合金的真空熔化可以增强如强度和塑性的一些性能，因为其清洁度以及与之有关的成分控制得到了提高。

形变加工（初轧）

如同在上一节所指出的，超合金铸锭的组织由溶质贫乏的枝晶和溶质富集的枝晶间区域所组成。这种含有充足的铝、钛或铌的合金具有在工业上有用的时效硬化效用，在进行形变加工之前有必要先对铸锭进行热态处理。这种热态处理，即所谓的“均质化处理”，就是在接近合金初始熔化的温度中长时间的放置（48 个小时都是很普通的）。必须借助均质化消除偏析的程度取决于合金的成分和所采用的熔化方法。为对超合金的微量浓度差进行大规模均衡化，均质化处理一般是有效用的，在一些大的初始枝晶形成区域可以保留一些残留的微量差。

自耗重熔的超合金一般用于制造锻造零件或薄板/厚板。锻制品通过中间（钢坯）锻造工艺进行生产的，在此过程中完成铸造组织的细化，并确立重结晶的晶粒大小。随后，从钢坯上切断下的坯块经模锻可以使组织进一步细化，或就将坯块压制成所要求的形状，而仍保持原来钢坯的组织。

同样的，用于压制成薄板的铸锭也要经初轧成为轧机所要求的进料尺寸。在后续的薄板轧制工艺中，大幅度的压缩量降低了对初轧组织进行与锻造毛坯的压缩量相比的控制需要。于是对于某些利用 ESR 作为二次熔化的合金而言，其铸锭也可以“铸造”成扁坯，以便能直接进入轧制工序。

形变加工性主要受成分、其次受显微组织的影响。超合金的变形加工最佳应变和温度条件可以用“加工图”确定。在超合金中，高硫含量会使有利的加工范围变小，而像镁的添加元素能抵消硫的影响并扩大其加工范围。在加工的任何阶段都会在晶粒的边界上形成不良的显微组织。图 2.8-6 所示是一个在初生晶粒边界上生成碳化物的例子。这种组织将会缩小

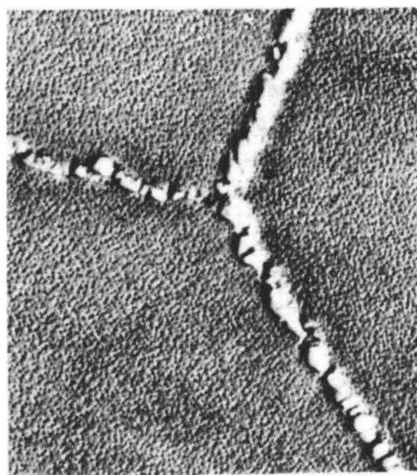


图 2.8-6 超镍-基合金（Waspaloy）经高温锻造均匀加热后不再压缩，而是进行正常的固溶处理和时效，最后在其晶界生成的连续或接近连续的 MC（碳化物）薄膜

加工条件的范围。表2.8-5列出的是一些超合金及其名义锻造温度。像IN 100这样的超合金，锻造温度会根据是否使用等温/超塑性锻造而发生改变。晶粒的细化要求也会影响锻造工艺。

表2.8-5　超合金的可锻性评定

合　　金	锻造温度		可　锻　性
	℃	℉	
A-286	1065	1950	极佳
Inconel 901	1095	2000	好至极佳
Hastelloy X	1095	2000	极佳
Waspaloy	1080	1975	好
Inconel 718	1065	1950	极佳
Astroloy	1095	2000	相当好

引自：参考文献[2]。

为了细化锻件中的晶粒组织（改善耐低周疲劳和/或耐应力断裂的性能），通常在比表2.8-5所列的更为严格的温度范围里对析出硬化超合金进行加工。限制温度范围可以在锻造过程中不至于让全部析出元素都留在固溶体里，于是形成对晶粒边界的牵制并限制晶粒的生长。锻造的条件必须要进行选择和控制，以便在温度不超过析出物的溶解温度时，还能以足够的应变和温度进行重结晶。在锻件的热处理过程中，通过无论对锻造组织的直接时效处理还是经“准”固溶处理后的时效处理都必须使上述加工得到的晶粒组织得以保持，其时效温度均不超过所有析出物的实际溶解温度。

上述加工方法主要应用于直接时效的IN 718的生产中。图2.8-7所示是IN 718中析出物的时间-温度-转变（TTT）图。注意TTT图并不表示各种析出物的相对体积。在IN 718中，γ″和δ大大超过γ′的体积。在低温下，亚稳态的γ′和γ″占主导地位。在高于925℃（1700℉）的温度下，主要为δ相。在约为925℃（1700℉）的温度里，δ相形成一种针状的魏氏（Widmandtätten）组织。随着温度的升高，δ相的形貌变得更加短而粗。当在高温（980～1010℃或1800～1850℉）下受到形变作用时，δ相发生球化。随着温度的升高，稳定析出物的体积减小，并当达到固溶相线的温度就会完全溶解。故而，在980～1010℃（1800～1850℉）的温度里进行热变形加工，就会导致小体积球状δ相的形成，它会阻碍晶粒边界的生长。在固溶体里保留较大百分比的铌，可以在锻件的后续直接热处理（时效）中形成强化γ″析出物。

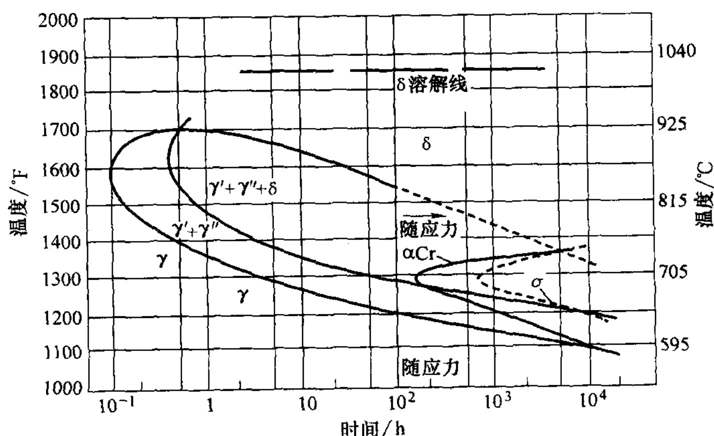


图2.8-7　IN 718的TTT图

粉末加工工艺

粉末技术正在广泛应用于超合金的生产。高强度燃气轮机转子盘的主要合金组成，如IN 100或René 95就是用粉末加工而成的，它们很难甚至无法用常规的方法进行锻造。在粉末生产中利用惰性气氛，常通过气体雾化并采用挤压或热等静压压制（HIP）的方法将其固结。后一种工艺用于生产型材，并直接用于最终的切削加工，或者固结成钢坯供进一步的锻造。挤压或HIP得到的钢坯常经过等温热锻成为各种形状，再供其最终切削加工。极小的偏析、较小的夹杂物尺寸、使用非常高的$V_f\gamma'$成分的能力以及晶粒尺寸的易控性都是粉末加工工艺的突出优点。利用粉末加工特别是采用少切削加工盘形零件的HIP成形还有可能降低成本，但是实际节省成本的程度取决于合金和零件的复杂性。还有一种粉末加工技术，即高压气体雾化（Osprey）工艺（或其变型）通过将粉末反复喷涂在适当的型芯上来制成的产品。

从力学性能的观点来看，一般最好对粉末生产加工零件进行形变强化加工。设计人员对于经过一定程度的形变强化加工后的零件可能更具信心。形变强化加工被认为能增强亚表层瑕疵的检测性，这种瑕疵会影响工件的断裂力学寿命。也有人称Osprey固结的零件是否采用进一步形变强化加工可视情况而定，但形变强化加工还是可取的。P/M的另一个问题就是在粉末产品中保持低气体含量，使其潜在缺陷为最少的重要性。粉末冶金超合金中过量气体的原因包括带凹陷的氩气雾化粉末颗粒和成形模体的泄漏或者在其固结之前成形模体里抽空和清

吹不够。

粉末技术也应用于生产 ODS(氧化物渗透强化)型的汽轮机叶片/叶轮合金。机械合金化主要是一种利用必要的氧化物/应变能相结合，并以此取得最佳性能的技术。快速凝固速度(RSR)技术用于生产高合金(非常高的 $V_f\gamma'$)的超合金，并显示了其先进的在汽轮机上应用的前景。快速凝固速度和 ODS 合金都得益于取向性晶体的生长，其方式就像能进行定向铸造的合金。在 ODS 中，利用定向重结晶能产生有益的多晶体的晶粒方向性，即沿平行于承载主轴方向延长的晶粒(高纵横比)。

熔模铸造

钴-基、高 $V_f\gamma'$镍-基和 IN718γ''-硬化的超合金，都可以用熔模铸造生产具有最终复杂形状的零件。铁-镍-基超合金通常不适宜用熔模铸造。熔模铸造可以获得错综复杂的内部冷却通路和凹角，并生产出尺寸非常精密的近似最终的形状。大部分的熔模铸件都属于小晶粒随机取向的多晶体制品，其重量范围从 1lb 以下到几磅，但是柱状晶粒和单晶体的零件可大到 4.5 ~ 9kg(10 ~ 20lb)的重量。此外，大型熔模铸件可以铸造成外形直径达数呎及重量达几百磅。普通用于获得大型型材并有经济效益的铸造合金为 IN 718，这是能以多晶、柱状晶粒或单晶形式铸造成较小零件的一大类合金。VIM 可用于熔模铸造生产镍-基和某些钴-基超合金的重熔毛坯。用于生产超合金的熔模铸造工艺所需的真空感应熔化热量远小于用于生产锻压合金毛坯的工艺所需的 VIM 热量。

利用石蜡或塑料制作的模型生产铸件。模型根据需要可以进行多次复制，通常采用传统机械制造的注射工装。对于有着复杂的内部特征的中空铸件，通过将陶瓷砂浆注射入一模具空腔，先制成一个按其内部空腔复制而成的陶瓷阳模，用于作为陶瓷型芯。然后将该型芯置于石蜡注射模具里并用石蜡将其封裹。将适当数量的蜡模粘附于一颗“树”上并安上浇口、流道、冒口等，用于将金属从浇口一直引入到零件的几何形腔。

将组合而成的蜡树浸进入砂浆，用不同粒度的陶瓷砂砾对其进行敷裹，接着在可控的条件下使之干燥，由此将蜡树制成陶瓷熔模。需要进行许多次这样的敷裹过程才能形成令人满意的陶瓷外壳，使熔模树干燥并将石蜡烧化。然后在较高的温度中煅烧熔模并通过烧结达到最高强度。成型的熔模型腔就可待使用了。

许多的合金都可使用熔模铸造，包括 VIM 超合金、钢和铝。将这些金属熔化并倒入熔模，产品就在按其大、小，多晶体、柱状晶粒或单晶体而确定的条件下进行固化。在多晶体产品里的晶粒大小受控于熔模上适当的初始浸涂、铸型金属的浇注温度和所选用的铸型保温。如微铸-X(Microcast-X)方法，就是利用非常低的过热(低浇注温度)和一个经加热的铸型来制造细晶粒(ASTM 5 至 3)的超合金。在柱状晶粒或单晶体产品中的晶粒方向为具有适当热梯度的专用炉以及所选用的滤渣装置和/或成核起始物的位置所控制。

浇铸之后，将已膨胀的陶瓷外壳去除，并将零件从树上切断。如果铸件有用于形成内部结构的陶瓷型芯，则用苛性碱化学物质将其去除。由此，阳性型芯让位于具有复杂内部结构的阴性空腔。大部分的铸件经过一般的热处理使经强化的金相组织和析出相得以均质化，并优化其力学性能。然后，铸件要经过 X 射线检查(内部缺陷)，荧光渗透检查(外部缺陷)，晶粒化学腐蚀(晶体完整性)，超声波检测(中空零件的壁厚)和尺寸检查。

夹杂物、粗晶粒大小、在型芯溶除中的表面侵蚀、型芯偏移和壁厚不足都是超合金在熔模铸造中遇到的一些问题。这些问题若不予以很好的控制，将会降低铸件的产量并造成潜在的性能降低。夹杂物受熔化技术的控制，并利用滤渣装置可挡去铁渣。选择性表面侵蚀可以通过经改进的蒸压溶除工艺进行控制。在过去几十年里，鉴于型壳和型芯的材料、铸模设计、再加上控制晶粒和夹杂物的大小方面所进行的改进导致铸造生产的进步，时而还能使铸件的强度得到提高。铸造疏松是有大型横截面的零件和用某些高 $V_f\gamma'$合金制造的小零件的一个问题。用于粉末加工的热等静压压制技术已经在许多情况里成功地应用于消除非表面连接的疏松，尤其是在一些大型的铁-镍-基和镍-基的超合金的铸件中。因为 HIP 能提高铸件的质量，一般其疲劳、蠕变寿命也因此得到提高(图 2.8-8)。

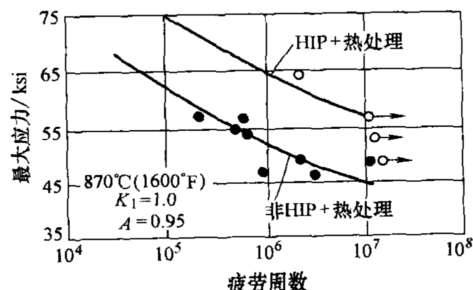


图 2.8-8 René 80 的热等温压制(HIP)对其耐高周疲劳的有利影响

镍-基超合金的定向铸造技术已经成为一种广为接受的生产工艺。在炉内的凝固循环过程中，使之形成单一方向的热流，由此产生柱形晶粒的定向凝固(CGDS)组织。由于晶粒在平行于自然生长方向上的模量减小而导致热疲劳寿命、伸长率的改善，而蠕变断裂强度(寿命)则是通过横向晶界的碎片的消除得以提高，因此使许多合金的性能都能得到相当大的提高。

一些飞机燃气轮机热室零件的单晶体生产就是柱状晶粒技术在应用上的合理推广。由于晶粒边界的缺失得以除去全部的晶粒边界并能调整合金的成分，即成为一种与前面所述的 CGDS 工艺相似的单晶体(SC)制品并从中受益，从而其强度能力得到相当大的提高。用于产出 SC 制品的定向铸造能提供成分上的灵活性，而且有可能为开发高强度的镍-基超合金另辟蹊径。虽然它开始仅限于生产飞机燃气轮机上较小的涡轮叶片零件，但是 CGDS 和 SC 工艺方法现已扩展到大型工业汽轮机叶片的生产。

定向凝固会给常见的超合金铸造带来新问题。夹杂物的可能增加(由于使用铪增强其横向塑性)、各自单独形成晶核、晶粒的杂乱取向以及黑斑孔隙晶粒的产生趋势(因枝晶浸蚀而由逆向偏析造成晶粒成核)都是 CGDS 产品铸造不合格的原因。黑斑孔隙、银、低角度的晶界(LAB)和杂乱晶粒都是在 SC 生产中的铸造问题。在 CGDS 和 SC 两种合金中，由后铸造工序中的表面应变以及过高温度引起的表面重结晶都会成为铸件不合格的原因。

虽然钴基超合金能够在柱状晶粒组织中进行定向的凝固，但它们总是被铸造成多晶体的零件。钴基超合金的单晶体制造还是可能的，但是尚未见诸报道。对于利用单晶或柱状晶粒的钴-基超合金，能否充分彰显其性能优势并证明其方法是否合算至今尚存疑义。

通过删减原来熔模铸造所需要的许多工艺步骤而形成的所谓快速成型制造的新技术使铸造工业发生了深刻的变化。这种删减已导致明显的硬件开发成本降低及其研发周期缩短。像快速激光成型、选域激光烧结和其他的三维印刷技术所能提供的铸造模型都无需使用昂贵的传统石蜡或陶瓷注射模。一些专用的机器能使用计算机辅助设计(CAD)，将设计转化为横向截面层，并在塑料、石蜡或聚合物里建立一个三维的几何图像。某些工艺还能直接(从三维 CAD 几何)建造供金属注入的三维陶瓷壳体。其他一些旨在从三维 CAD 几何直接进行金属制造的技术也正在开发中。这种技术借助低成本的迭代式设计将设计理念迅速转变为生产实践，从而通过更快速的产品开发实现其工业革新。

连接

钴-基超合金易于采用熔化极气体保护焊焊(GMAW)或钨极气体保护电弧焊(GTAW)技术进行连接。像 WI-52 的铸造合金和像 Haynes 188 的锻压合金都能进行深度焊接。焊条金属一般都用不太高的合金钴-基合金丝，虽然也使用其母焊条或焊丝(即其化学成分与所焊的合金一样)。钴-基超合金薄板还能成功地用电阻焊进行焊接。在使用中产生裂纹的燃气轮机叶片可以用上述技术焊接修复(例如 WI-52 叶片用 L605 焊条，并 540℃ 或 1000℉ 预热)。GMAW 和 GTAW 都需要适当的预热技术，以消除产生热裂的可能性。电子束焊(EBW)和等离子弧焊(PAW)都能用于钴-基超合金，但在大部分的应用中，因为这类合金的易焊性所以并不需要使用这些技术。

镍-基和铁-镍-基超合金的可焊性远不如钴-基超合金。这些合金由于存在 γ'强化相而容易对热裂(焊接开裂)和焊后热处理(PWHT)开裂(应变时效或延迟开裂)产生敏感。对热开裂的敏感性与铝和钛含量(γ'的促成剂)有直接的关系，如图 2.8-9 所示。热开裂发生在焊接的热影响区(HAZ)，其开裂的程度随合金成分和焊接件所受的约束而变化。

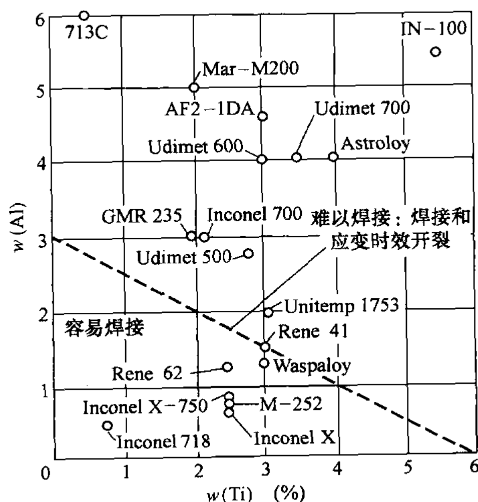


图 2.8-9 一些 γ'强化铁-镍-基和镍-基超合金的可焊接性图，表明铝和钛总含量的影响

镍-基和铁-镍-基超合金能用 GMAW、GTAW、EBW、激光和 PAW 技术进行焊接。若用焊条，则通常用强度较差一些而塑性较高一些的奥氏体合金，以此使热开裂降至最低限度。偶尔也与用基体金属成分

一样的焊条。一般在锻压合金的条件下，焊缝限于用较低的 $V_f\gamma'$（≤0.35）合金。当要求用焊条对使用零件进行焊接修复时，高 $V_f\gamma''$的铸造合金不能均匀一致地焊接成功。然而，EBW 能用于这类合金的结构连接。摩擦或惰性焊接也可以成功地应用于较低的 $V_f\gamma'$合金。

许多镍-基和铁-镍-基超合金都由于其 γ'强化机理和能力而能在固溶处理的条件下进行焊接。对于某些合金，可使用特殊的焊接前热处理。镍-铌合金，如典型的 IN 718 有着独特的焊接特征。硬化相 γ''比 γ'能在较低的温度下更为粘滞地析出，故而所伴随的与焊接有关的应变必须重新分布且更容易地适应于焊接金属里及其热影响区（HAZ）。合金是在固溶处理的条件下焊接并继之以焊接后的应力消除和时效处理，由此造成 γ'的析出。有些合金像 A-286 本来就是很难焊接的，尽管只有中等程度的 γ'硬化成分。有迹象表明高钛合金比与 $V_f\gamma'$相似的合金更难以焊接，并有赖于决定其强度性能的高铝/钛之比。

用于超合金的焊接技术必须说明的不仅有热开裂还要有 PWHT 开裂，特别当其涉及处于亚表层而难以被检测的微裂隙（微开裂）时。抗拉强度和应力断裂强度几乎不受微裂隙的影响，但是疲劳强度会急剧下降。

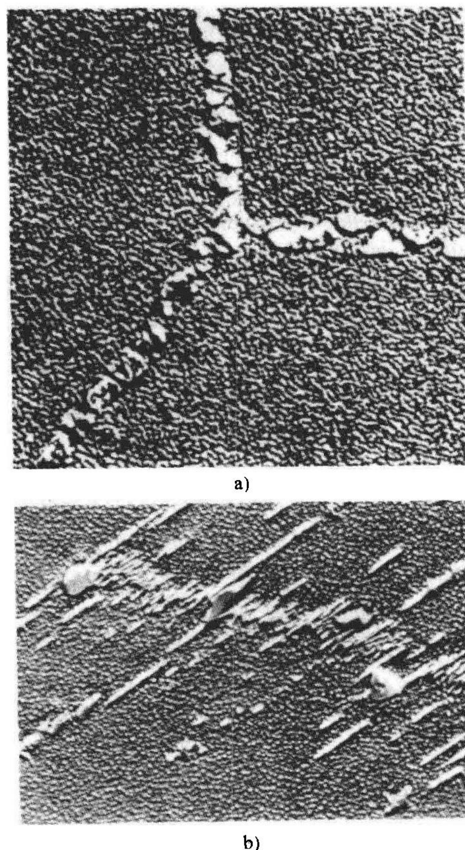
除了如上面所讨论的一般熔化焊接技术以外，镍-基和铁-镍-基合金还能作为薄板进行电阻焊；硬钎焊、扩散连接和瞬间液相（TLP）连接等技术也能应用于这些合金。硬钎焊连接的塑性比焊接更容易受限制，渗透连接尚未在超合金上得到推广应用。瞬间液相连接非常有用，主要应用于飞机燃气轮机上的涡轮机零件。作为一种与众不同的特征，TLP 连接所产生的极佳综合性能在于尽管它是像硬钎焊一样的较低温度连接，但是其后在连接温度中发生的渗透会形成完全的固化连接，其连接处有与基体金属相似的成分和两者之间难以区分的显微组织。于是，所形成的接头具有与其基体金属非常相似的熔化温度和性能。

性能与显微组织

超合金的主要显微组织变量为析出物的数量和形态、晶粒的大小和形状以及碳化物的分布。钛/铝型的镍-基和铁-镍-基合金的性能受控于全部上述三种变量，镍-铌合金另外还受 δ 相分布的控制，钴基超合金不受上面的第一种变量的控制。组织的控制是通过成分的选择/改进以及利用加工工艺来实现的。对于某一给定的名义成分，通过形变加工和铸造所形成的组织各具有其性能上的优点和缺点。铸造超合金一般有较为粗大的晶粒大小、较多的合金偏析和经改善的蠕变和断裂特性。锻压超合金一般有更为均匀、通常也更细的晶粒大小，以及经过提高的拉伸和疲劳性能。

Ni-Ti/Al 型的镍-基和铁-镍-基超合金一般是由 γ'分散在 γ 基体里而构成的，而且其强度随 $V_f\gamma'$的增加而提高。在铁-镍-基和第一代的镍-基超合金里发现 γ'的最低 V_f 量，这时 $V_f\gamma'$一般低于大约 0.25（25%体积分数）。在较低的 $V_f\gamma'$合金中的 γ'通常是呈球形的，但是在较高的 $V_f\gamma'$（≥0.35）镍-基超合金里通常又是呈立方形的。镍-铌-基型的超合金一般是由 γ''分散在 γ 基体里、再存在一些 γ'而构成的。γ'和 γ''硬化超合金所固有的强度性能是受硬化相在晶粒内部的分布所控制的，然而在多晶体合金里的有效强度还是由晶界状态所决定的，尤其受碳化物相形态和分布所影响，此外还受 δ 相分布的影响。

Ni-Ti/Al 合金可通过优化 $\gamma' V_f$ 并连同确保分散在晶体边界上的为离散球状碳化物的形态（非必要独立特征）（见图 2.8-10）而因此获得满意的性能。晶界



a)

b)

图 2.8-10 在 Waspaloy 中的碳化物的析出

a）有益的离散晶界型（10000×） b）不太有益的拉链形、断续型（6800×）

上断续的(网状的)碳化物或γ'会增加表面面积并急剧缩短断裂寿命，尽管抗拉强度和蠕变强度相对不受其影响。

锻压镍-基和铁-镍-基超合金一般要经处理才可获得最佳拉伸和疲劳性能。曾经，当锻压合金用于对蠕变强度有要求的用途上(如燃气轮机高压蜗轮机叶片)时，需采用的热处理方法与相同名义成分的合金用于对抗拉强度有要求的用途上所用的热处理方法是不同的，以此最大限度地延长蠕变断裂寿命。偶尔，一种合金如 IN 100 或 U 700/Astroloy 的名义成分要按照其是用于铸造还是锻压的条件而有所不同。

显微组织的演变

超合金含有不同种类的元素并由其组成大量能产生所要求功效的结合体。一些元素进入固溶体能形成下列一种或多种的性能：强度(钼、钽、钨、铼)、抗氧化性(铬、铝)、相稳定性(镍)，以及提高有用的二次析出物的体积比(钴)。其他元素的加入则为了形成硬化析出物如γ'(铝、钛)和γ''(铌)。微量元素(碳、硼)的加入是为了形成碳化物和硼化物，它们和其他元素(镁)的加入还有一个控制杂质元素的目的。将镧加入某些合金里可促进其抗氧化性，而钇加入到镀层里可提高抗氧化性。近年来，元素铼成为加入到镍-基超合金的主要化学物质，它能增大 CGDS 和 SC 合金温度范围的能力。看起来，铼是通过有效降低γ'的粗大化速度而取得上述效果的。许多元素(钴、钼、钨、铼、铬等)虽然加入时是为了提高其合金质量，然而在某些情况下却会以不利的相形式(σ、μ、Laves 等)析出。

这些元素中的一些会在显微组织中产生容易识别的变化，而另一些则会对显微组织产生非常细微的影响。对显微组织所产生的精细影响取决于加工工艺和热处理。对显微组织最为明显的影响包括几何密集型(gcp)相(如γ')析出、碳化物形成和形貌密集型(tcp)相(如σ)形成。甚至当相的种类已经确定时，显微组织的形态还会发生广泛的变化，例如块状碳化物的笔迹形、球状γ'的立方形、均匀性析出的网形、块状σ的针形以及包络状γ'的离散形γ'。典型镍-基超合金的显微组织从球形到立方形的演变如图 2.8-11 所示。

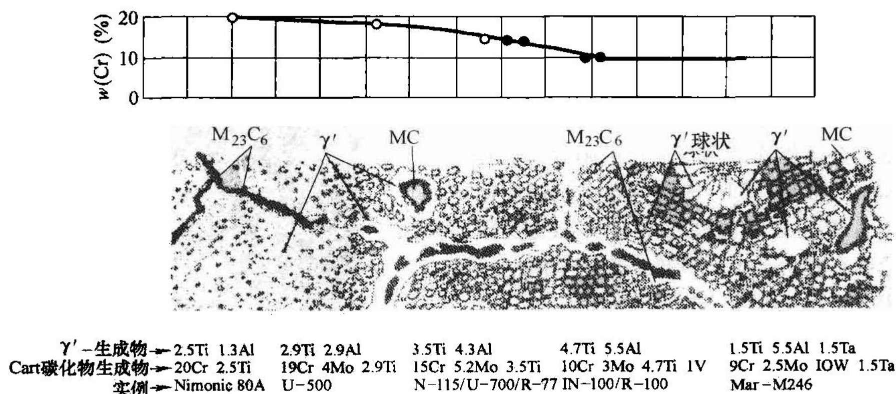


图 2.8-11 镍-基超合金的显微组织和铬含量的演变的定性表示。原始出自：参考文献[4]

γ'相是一种有序的($L1_2$)金属间化合物 fcc 相，基本成分为 $Ni_3(Al、Ti)$。合金元素会影响γ'与基体γ相、γ'逆相区域边界(APB)能、γ'形貌及γ'稳定性之间的不协调。与之相关的η相是一种成分为 Ni_3Ti 的有序(DO_{24})六方相，它在转变成η之前作为γ'的亚稳态的形式而存在。还发现其他种类的金属间化合物相，如δ、正交 Ni_3Nb，或γ''、bct 有序(DO_{22}) Ni_3Nb 的强化析出物。

碳化物也是超合金中的一种重要组成。为了产生所要求的强度和塑性，它们在铸造多晶体合金的晶体边界上的存在尤其必不可少的。锻造合金中的碳化物含量总是低于铸造合金，但是相信为获得最佳的强度特性还是需要一些碳化物的。随着超合金清洁度的提高，锻压合金中的碳化物含量将被降低。在现代锻压超合金的应用中，碳化物至少在大部分的情况下都成为断裂力学的限制标准。

特别在钴-基合金里，碳化物能在一定程度上强化基体，并且在一些锻压合金里，它们是控制晶粒大小所必需的。一些碳化物实际上并不受热处理的影响，而另外一些则需要有一次这样的处理。不同类型的碳化物有可能取决于合金成分和加工工艺。一些重要的类型为 MC、M_6C、$M_{23}C_6$ 和 M_7C_3，这里 M 代表一种或多种的金属原子。在许多情形里，碳化物是结合在一起而存在的，然而它们通常是在 MC 经破碎

后，在固态中相继发生反应而形成的，而正常情况下MC是在熔化状态中生成的。对于许多超合金，其普通碳化物的反应顺序是从MC到$M_{23}C_6$，而且重要的碳化物的形成元素为铬($M_{23}C_6$、M_7C_3)，钛、钽、铌和铪(MC)，以及钼和钨(M_6C)。硼也可替换碳参与其反应，并生成如MB_{12}、M_3B_2及其他的一些相。有一种关于硼的说法就是，通过调整硼/碳的比例所生成的初始硼化物更适合借助热处理进行形态上的改进。

所有的超合金都含有一些铬加上一些其他元素，用于提高其耐环境恶化的能力。铬的作用是为了促成在合金的外表面生成Cr_2O_3。当有充分的铝存在时，通过氧化反应会生成保护性更强的氧化物Al_2O_3。在镍-基超合金中，$w(Cr)$为6%～22%一般是很普通的，而$w(Cr)$为20%～30%是钴-基超合金的特征，且$w(Cr)$为15%～25%常见于铁-镍-基超合金。在镍-基超合金里，所含的$w(Al)$大约可达到6%。

从显微组织的角度讨论合金元素的功效，若不提及夹入元素则是不够完全的。元素如硅、磷、硫、铅、铋、碲、硒和银通常只有低至百万分之几的含量(ppm)，甚至用光学显微镜或电子显微镜都观察不到，但是也会涉及性能的下降。显微探针和俄歇电子能谱分析能够测定晶界上局部分布的高浓度夹入元素。像镁这样的元素趋向于以化合物的形式挟裹某些有害的元素(如硫)，而钛趋向于挟裹元素氮成为TiN。此时，常能在显微组织中观察到这些及其他类似的化合物。

加工工艺的功效

加工工艺可以认为是一种使超合金变成其成品形式的工艺/技术。加工工艺和合金元素是相互依赖的。由加工工艺所引起的一般显微组织变化形成于全部合金元素再加上工艺程序。热处理对于相的作用在后面考虑原始显微组织的影响时将会涉及，成分对于相的作用前面也都讨论过了。表2.8-6和表2.8-7所列的是与各种普通超合金有关的一般热处理数据。

表2.8-6 锻造超合金的一般固溶处理和时效规范

合金	固溶处理				时效			
	温度 ℃	温度 ℉	时间/h	冷却工序	温度 ℃	温度 ℉	时间/h	冷却工序
铁-基合金								
A-286	980	1800	1	油淬	720	1325	16	空冷
Discaloy	1010	1850	2	油淬	730	1350	20	空冷
					650	1200	20	空冷
N-155	1165～1190	2125～2175	1	水淬	815	1500	4	空冷
Incoloy 903	845	1550	1	水淬	720	1325	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
Incoloy 907	980	1800	1	空冷	775	1425	12	炉冷
					620	1150	8	空冷
Incoloy 909	980	1800	1	空冷	720	1325	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
Incoloy 925	1010	1850	1	空冷	730①	1350①	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
镍-基合金								
Astroloy	1175	2150	4	空冷	845	1550	24	空冷
	1080	1975	4	空冷	760	1400	16	空冷
Custom Age625PLUS	1038	1900	1	空冷	720	1325	8	炉冷
					620	1150	8	空冷

（续）

合　金	固溶处理				时效			
	温度		时间/h	冷却工序	温度		时间/h	冷却工序
	℃	℉			℃	℉		
镍-基合金								
Inconel 901	1095	2000	2	水淬	790	1450	2	空冷
					720	1325	24	空冷
Inconenl 625	1150	2100	2	②	—	—	—	—
Inconenl 706	925～1010	1700～1850	—	—	845	1550	3	空冷
					720	1325	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
Inconel 706③	980	1800	1	空冷	730	1350	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
Inconel 718	980	1800	1	空冷	720	1325	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
Ioconel 725	1040	1900	1	空冷	730①	1350	8	炉冷
					620	1150	8	空冷
Ioconel X-750	1150	2100	2	空冷	845	1550	24	空冷
					705	1300	20	空冷
Nimonic 80A	1080	1975	8	空冷	705	1300	16	空冷
Nimonic 90	1080	1975	8	空冷	705	1300	16	空冷
René 41	1065	1950	1/2	空冷	760	1400	16	空冷
Udimet 500	1080	1975	4	空冷	845	1550	24	空冷
					760	1400	16	空冷
Udimet 700	1175	2150	4	空冷	845	1550	24	空冷
	1080	1975	4	空冷	760	1400	16	空冷
Waspaloy	1080	1975	4	空冷	845	1550	24	空冷
钴-基合金								
S816	1175	2150	1	②	760	1400	12	空冷

注：可以使用不同的处理方法改进所规定的性能。

①如果炉子的尺寸/装载不允许快速加热至初始时效温度，那么推荐的受控直线上升范围为590～730℃（1100～1350℉）。　②为了在固溶处理后进行合适的淬火，必须以足够快的速度冷却到540℃（1000℉）以下，以此防止在中间的温度范围里发生析出。对于大部分合金的金属薄板零件，快速空冷已能满足要求。油或水淬火常被要求用于较厚的、不会遭受开裂的截面。　③Inconel 706在有拉伸极限的用途里，热处理用于增强其拉伸性能而不是耐蠕变性。

表2.8-7　用于经析出强化的铸造超合金的一般热处理规范

合　金	热处理（温度/持续时间，h/冷却）
多晶体（常规的）铸件	
B-1900/B-1900+Hf	1080℃（1975℉）/4/AC+900℃（1650℉）/10/AC
IN-100	1080℃（1975℉）/4/AC+870℃（1600℉）/12/AC

（续）

合 金	热处理（温度/持续时间，h/冷却）
多晶体（常规的）铸件	
IN-713	铸造即可
IN-718	1095℃(2000℉)/1/AC+955℃(1750℉)/1/AC+720℃(1325℉)/8/FC+620℃(1150℉)/8/AC
IN-718 采用 HIP	1150℃(2100℉)/4/FC+1190℃(2175℉)/4/15ksi(HIP)+870℃(1600℉)/10/AC+955℃(1750℉)/1/AC+730℃(1350℉)/8/FC+655℃(1225℉)/8/AC
IN-738	1120℃(2050℉)/2/AC+845℃(1550℉)/24/AC
IN-792	1120℃(2050℉)/4/RAC+1080℃(1975℉)/4/AC+845℃(1550℉)/24/AC
IN-939	1160℃(2120℉)/4/RAC+1000℃(1830℉)/6/RAC+900℃(1650℉)/24/AC+700℃(1290℉)/16/AC
MAR-M246+Hf	1220℃(2230℉)/2/AC+870℃(1600℉)/24/AC
MAR-M247	1080℃(1975℉)/4/AC+870℃(1600℉)/20/AC
René 41	1065℃(1950℉)/3/AC+1120℃(2050℉)/0.5/AC+900℃(1650℉)/4/AC
René 77	1163℃(2125℉)/4/AC+1080℃(1975℉)/4/AC+925℃(1700℉)/24/AC+760℃(1400℉)/16/AC
René 80	1220℃(2225℉)/2/GFQ+1095℃(2000℉)/41GFQ+1050℃(1925℉)/4/AC+845℃(1550℉)/16/AC
Udimet 500	1150℃(2100℉)/4/AC+1080℃(1975℉)/4/AC+760℃(1400℉)/16/AC
Udimet 700	1175℃(2150℉)/4/AC+1080℃(1975℉)/4/AC+845℃(1550℉)/24/AC+760℃(1400℉)/16/AC
Waspaloy	1080℃(1975℉)/4/AC+845℃(1550℉)/4/AC+760℃(1400℉)/16/AC
柱状晶粒（CG）铸件	
DSMAR-M247	1230℃(2250℉)/2/GFQ+980℃(1800℉)/5/AC+870℃(1600℉)/20/AC
DSMAR-M200+Hf	1230℃(2250℉)/4/GFQ+1080℃(1975℉)/4/AC+870℃(1600℉)/32/AC
DS René 80H	1190℃(2175)/2/GFQ+1080℃(1975℉)/4/AC+870℃(1600℉)/16/AC
单晶体铸件	
CMSX-2	1315℃(2400℉)/3/GFQ+980℃(1800℉)/5/AC+870℃(1600℉)/20/AC
PWA 1480	1290℃(2350℉)/4/GFQ+1080℃(1975℉)/4/AC+870℃(1600℉)/32/AC
René N4	1270℃(2320℉)/2/GFQ+1080℃(1975℉)/4/AC+900℃(1650℉)/16/AC

注：AC，空冷；FC，炉冷；GFQ，气体炉淬火；RAC，快速空冷。

晶粒的大小、形状和方向（指各向异性的组织）是三个与工艺有关的最重要的显微组织变量，而不是从成分/热处理的相互作用中得到的一些参数。从铸造组织到锻压组织，晶粒的大小发生相当大的变化，一般来说后者要小得的多。特殊工艺加工——例如定向凝固或定向重结晶——不仅能影响晶粒的大小，而且还影响晶粒的形状和方向的变化，要引起机械和物理性能的变化。然而腐蚀作用也主要取决于成分。

原始显微组织对性能的影响

镍-基和铁-镍-基超合金可以借助于 γ' 或 γ'' 的析出而硬化。铁-镍-基和第一代镍-基合金中的 γ' 都是球形的，此后的合金中的 γ' 则一般为立方形的（见图 2.8-12）。γ'' 相是呈盘形的。在锻压铁-镍-基里 γ' 的 V_f 一般约为 0.2 或更小，但是在镍-基超合金里的则会超过 0.6。在合金组成中对于其 γ'' 硬化合金的 $V_f\gamma''$ 方面能有深入了解的还不够多。

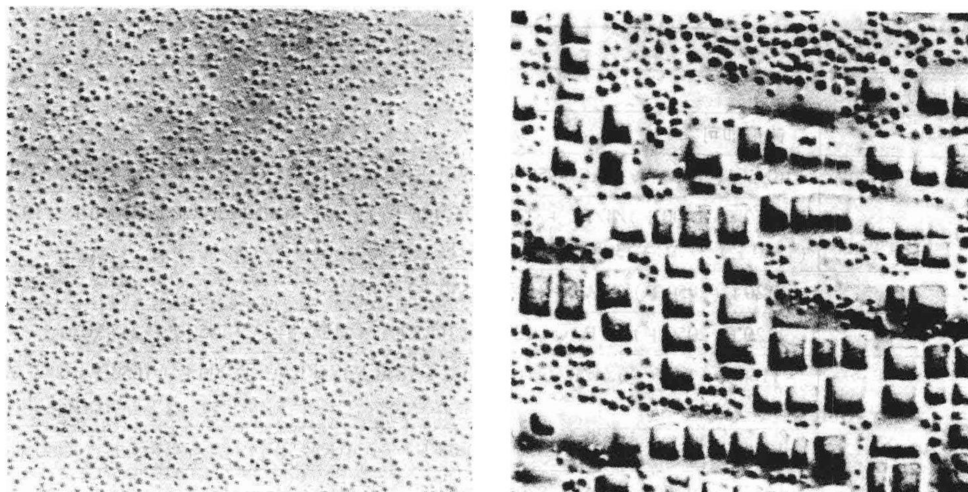


图2.8-12 锻造镍-基超合金显示其早期(低 $V_f\gamma'$)合金(Waspaloy,左)的球形特征，及其晚期(高 $V_f\gamma'$)合金(U700,右)的立方形特征。注意在U700中一次立方的γ'颗粒之间的二次(冷却)γ'。原始放大倍数，6800×

γ'的析出。析出物颗粒的强化作用与许多因素有关，在γ'的情形里可以建立它与γ'的 V_f 以及γ'颗粒的大小最为直接的关系。然而在工业合金可识别颗粒的大小范围里，强度与γ'大小之间的关系难以验证。在析出的过程中，在时效硬化达到峰值以前，其强化的作用机制就是通过位错而发生γ'颗粒的切割，并且在γ'的 V_f 保持不变的情况下，其强度随γ'大小的增大而提高(见图2.8-13)。在时效硬化达到峰值以后，其强度随颗粒的连续增大而下降，因为位错不再切割γ'颗粒，而只是绕行而过。这种影响可用于说明在低 $V_f\gamma'$合金(A-286、Incoloy 901、Waspaloy)中的拉伸或硬度特性，但是这种影响在高 $V_f\gamma'$合金，如MAR-M246、IN 100等中就不那么显而易见了。这种影响对于

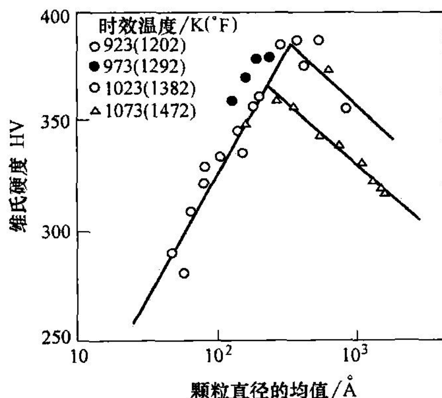


图2.8-13 镍-基超合金的强度与颗粒直径。小颗粒发生切割，而大颗粒则环绕而过。注意时效温度也会影响与颗粒大小相关的强度上

蠕变断裂也不够明显，然而为了达到最佳性能，最好还是取其均匀的、细至中的γ'大小(0.25~0.5μm)而不是粗大或超细的大小。

钛/铝硬化合金的合金强度显然取决于 $V_f\gamma'$。通过加入较多的硬化剂元素(铝、钛)，使 $V_f\gamma'$及由此形成的强度提高到一个新的高度上。合金强度随铝+钛的含量增加而提高(见图2.8-14)，还随铝与钛比值

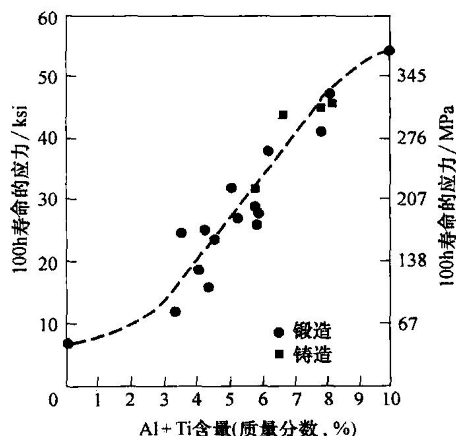


图2.8-14 温度为870℃(1600℉)时的铝和钛含量分别对锻造和铸造的镍-基超合金强度的影响

的增加而提高。在锻压合金中，γ'通常以细γ'的双峰(双联)分布而存在，而且所有的铝+钛含量都对硬化工艺起到有效作用。在铸造合金中，由于偏析和冷却速度的影响所形成的γ'析出物特征会有极大的可变性。大量的γ-γ'共晶体和粗大γ'会在凝固过程中

生成。随后进行的热处理能改善其组织。双峰和三峰γ′分布加上γ-γ′共晶体可以在热处理后的铸造合金中发现。以充分高温度的固溶处理可以使合金均质化并溶解粗大的γ′和γ-γ′共晶组分，并继之以均匀细化的γ′析出，由此提高合金抗蠕变的能力。然而初始熔化温度限制了在许多多晶体或CGDS的超级合金里的可能均质化。对于柱状晶粒的镍-基超合金，在980℃(1800℉)的温度下，可发现在蠕变断裂寿命和细γ′的V_f之间有直接的相关性存在(见图2.8-15)。

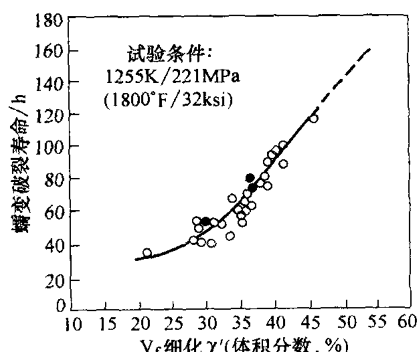


图2.8-15 蠕变破裂寿命随细化γ′的V_f的增加而增加，以柱形晶粒、方向性固结的镍-基超合金PWA 1422(MarM-200加入铪后的变型)**为例说明**

一般来说，为了在γ′硬化合金中达到最大硬化，有必要在γ′固溶相线以上的温度对合金进行固溶处理。可通过一次或多次的时效处理优化γ′的分布，并促使其他相如碳化物的转变。在一些合金里可以使用多次中温的和较低温的时效处理；在铸造合金或V_fγ′非常高的锻压合金里，可以在中温时效工艺过程之前，先使用一种镀层工艺过程或高温时效的处理。当一种超合金经过多次时效处理时，会表现出上述双峰或三峰的γ′分布。镍-基超合金的γ′硬化的基本特点就是溶解γ′的温度波动也未必会造成性能的永久损失，因为之后冷却到正常运行状态仍会以有用的形式析出γ′。

在最后的分析中，不可能只是考虑γ′相来判别合金的功能。γ′-硬化晶粒的强度必须与晶界的强度相平衡。如果γ′-硬化基体相对于晶界变得强得多，则会由于在晶界上的应力释放变困难而发生早期失效。

γ″析出。γ″相同性能的关系尚未被进行深入的研究。强度将取决于γ″的V_f，然而由于其析出物的形态不同(γ′-硬化合金形成的是立方形或球形的析出物，而γ″析出物则是圆盘形的)，为γ′-硬化合金建立的任何定量关系都无法用于确定γ″-硬化合金。镍-铌合金在相对较低的温度里，可能会使强化相发生逆变或溶解。γ″的双峰分布不一定能发现，倒是存在着成对的γ″和γ′分布形式。

镍-铌合金的热处理是为了优化γ″相的分布以及控制晶粒的大小。虽然许多年以来，为在工件经锻造后获得合适的γ″分布，一直都采用一种顺序固溶处理、再继之以两步时效的工艺路线，但如今情况不再一样了。现在大多数情况下，这种工序都被镍-铌合金工件从锻造温度冷却之后直接进行时效的工艺所代替，从而形成一种伴有γ′析出物的均匀γ″分布。请见后面的叙述以及前面“变形加工(初轧)”一节中有关IN 718直接时效的讨论。

γ″析出的实际应用只限于w(Nb)超过4%的镍-基合金。在合金中，形成γ″的IN 718是一个合金在工业上开发利用的突出例子。γ″在IN 718中的V_f明显超过γ′在IN 718中的V_f。γ″和γ′两者都能在有γ″存在的合金里发现，但是γ″将是占有主导地位的强化剂。虽然γ″的强化特性尚未得到研究，但是如同前面所述的对γ′特性的解释也许能对其适用，即有针对强度而存在的最佳γ″大小及其V_f。γ″最重要的特点可能就是在经受热处理或连接工艺的初始固溶之后，它还能在适中温度下易于形成。由于这种特性，γ″硬化合金还能在焊接之后，经过时效而产生一种充分强化的组织并具有极佳的塑性。

作为一种通常不稳定的相，γ″相经过长时间的放置会转变为γ′和δNi_3Nb。γ′相强度是附加在γ″相的强度上的。IN 718中的无缺口塑性与其无γ″析出物区域(PFZ)有关，通过适当的热处理能消除γ″ PFZ并使其塑性恢复。以γ″相硬化的合金能获得较低温度下的高抗拉强度和非常好的蠕变断裂性能，但是超过675℃(1250℉)，γ″会转变为γ′和δ并造成强度的急剧降低。

碳化物析出：晶界硬化。碳化物在晶界上的析出会对性能产生深刻的影响。大部分的超合金在铸后或固溶后的热态处理过程(如时效)之后都会在晶界上生成$M_{23}C_6$。经发现，离散的球状$M_{23}C_6$碳化物链通过在蠕变断裂中防止晶界的滑移而优化蠕变断裂寿命，同时为消除应力并避免早期失效而在所围绕的晶粒中形成充分的塑性。

成为对照的是，如果碳化物作为一种连续晶界膜析出，其性能将大大降低。据报道$M_{23}C_6$膜会降低M252的耐冲击性，而MC膜则是造成锻造Waspaloy的断裂寿命和塑性降低的原因。作为另一极端情况，当晶界上没有碳化物析出物的存在时也会发生早期失

效，主要是因为其晶界的移动不受限制，导致在晶界三叉点的顺序开裂。

文献有关碳化物在铁-镍-基超合金晶界上的作用的记载不如在镍-基合金的多，虽然碳化物膜的负面影响已有所报道。对于钴-基合金的晶界碳化物的特定影响的研究甚至更少，因为钴-基合金中的碳化物分布形成于初始铸造或锻压钴基合金在轧制退火后的冷却过程中。钴-基合金里明显较大的含碳量将导致比镍-基和铁-镍-基合金广泛得多的晶界碳化物析出。在铸造钴-基合金晶界上的碳化物，以 M_6C、$M_{23}C_6$ 和 fcc δ 钴-基固溶体的共晶聚合体形式出现。关于钴-基超合金晶界上不同形式的碳化物对其力学性能的影响尚未有权威的报道。

在铸造钴-基超合金里的碳化物（$M_{23}C_6$-M_6C）层片状共晶体（碳化物-γCo）是很有意思的。当镍-基和铁-镍-基里的 $M_{23}C_6$ 都以网状的形式析出时，其形貌都有些相似，并导致这些合金的力学性能降低，但层状共晶体似乎不会让铸造钴-基合金的性能降低。当不能在 705～760℃（1300～1400℉）的时效之前通过中间相的析出处理时，将因固溶处理所产生的碳高度过饱和予以释放，就会发现镍-基合金里的网状组织在生长。镍-基超合金的塑性也会因析出的类型不同而降低——即在晶粒和栾晶界上的魏氏 M_6C。然而，B-1900 镍-基合金经过暴露之后，在晶体内形成的魏氏 M_6C 看来不会降低其性能。

由晶界上的 $M_{23}C_6$ 碳化物析出对晶界各侧面造成的另一种影响就是贫 γ′ 析出物区域的偶尔形成。这些 PFZ（即无 γ″ 析出物区域）会对镍-基和铁-镍-基超的断裂寿命产生重要影响。如果这样的区域范围变大或比基体弱得多，那里的变形就会集中起来并导致早期失效。更复杂（较高 $V_f\gamma'$）的合金不会表现出明显的 PFZ 影响，可能是因为它们对于 γ′ 的形成元素具有较高程度的饱和。PFZ 同时出现的又一种难以与之作明确区分的影响就是 γ′ 包膜，它是由 TiC 的破裂和由此而成的 $M_{23}C_6$ 或 $M_6C+\gamma'$（由过量的钛）所形成的。这不仅由于 γ′ 包膜形成不足所起的作用，而且还由于真正作为无论是 η 相还是能在使用过程中转变成 η 的亚稳态 γ′ 的过量富钛区的形成可能性都极小。

碳化物析出：基体或一般性硬化。碳化物通过在晶粒内的形成而影响钴-基超合金和某些镍-基和铁-镍-基超合金的蠕变断裂强度。在钴-基铸造超合金中，长条骨架型的 MC 碳化物自由地散布于晶粒内，形成一种弥散型的硬化，由于其相对粗大，故其硬化的幅度并不大。可以通过热处理改善铸造合金里的碳化物分布，但是在除了最高以外的所有温度下所能达到的强度都大大低于 γ′ 硬化合金。由此，铸造钴-基合金一般并不进行热处理，除非另有所图，有时需经过 1065～1120℃（1950～2050℉）4h 的镀层渗透热处理。

锻压钴-基超合金能在制造的工艺过程中使碳化物得到改善。碳化物在锻压合金里的分布是通过最终变形加工后的轧制退火而形成的。其性能在很大程度上是作为晶粒大小、耐熔金属含量和含碳量的结果，以此表明可以用碳化物的 V_f 值代表其硬化。

真实固溶就是指所有的微量组分都溶解掉，这对于大部分的钴-基超合金都是不可能的，因为熔化常发生于碳化物的全部固溶之前。通过热处理可以增强一些蠕变断裂性能。改进型维塔利（Vitallium）钴基超合金可通过时效获得在断裂时间上的改进（见图 2.8-16），增加合金的含碳量能使其得到更大的改进。由于碳化物的溶解或过度时效，固溶处理和时效都不适合用于生产在 815℃（1500℉）以上的温度中应用的稳态钴-基超合金。

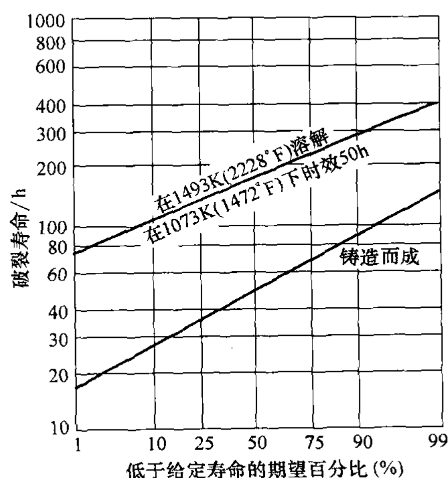


图 2.8-16　热处理对钴-基超合金（HS-31，也即为 X-40）**的影响**。可见因碳化物的析出，使强度提高

镍-基和铁-镍-基超合金里的基体碳化物也可被部分固溶。然而，没有合金的早期熔化，MC 碳化物将不会全部溶解；如果合金具有足够高的钼＋钨含量，它就可能变得不稳定，并且会在低于约 815～870℃（1500～1600℉）的温度里分解成 $M_{23}C_6$ 或者可能在 980～1040℃（1500～1600℉）的温度里转化为 M_6C。基体碳化物一般只能为镍-基和铁-镍-基超合金提高非常小的强化程度。

随着镍-基超合金的单晶体的出现，产生了一种有趣的显微组织倾向。由于不存在任何晶界，也几乎不需要如碳那样的常规晶界强化剂，故而在第一代的

SC 合金里存在极少的基体或亚晶界的碳化物。虽然其初衷是要从 SC 镍-基超合金中完全去除碳，但结果却是有利于单晶体中的亚晶界从碳化物中形成，从而导致解除对碳的制约并造成许多单晶合金的低含碳量（还可含有限的铪、硼和锆）。如上所述，锻压镍-基超合金将不断趋向于含碳量的减少和碳化物大小的减小。

基体碳化物（还有晶界碳化物）的另一个也许是最为普通的负面作用是，它们在疲劳开裂过程里，助长早期开裂或在未经镀层的合金表面因氧化而造成的一种缺口影响。因切削加工或热应力而引起碳化物的氧化或预开裂能引发疲劳裂纹。预开裂的碳化物与其初始铸造工艺有关。碳化物的大小是十分重要的，减小镍-基合金中的碳化物的体积及其大小能减少预开裂的碳化物。早期定向凝固过程中较长的凝固时间和较低的梯度常会形成适度大小的碳化物。然而改善 SC 合金（极少或无碳化物）的梯度和降低含碳量，能使其抗疲劳性得到相当的提高，尤其对于超过具有正常含碳量和有类似方向性的 CGDS 合金。在低周疲劳（LCF）和热机械疲劳（TMF）中，这种效果最为突出。现在还没有迹象可用于解释碳化物的缺失对于高周疲劳（HCF）的影响，但能期待其有利影响。

氧化的碳化物可以借助几种方法尽量减少或予以避免。通过改进铸造工序和/或化学成分，可以产生较小的初生碳化物。粉末冶金工艺也可用于达到同样的目的。如果并无必要使合金达到所要求的强度指标，则可以降低含碳量。减少含碳量是 SC 和粉末冶金的超合金的规则。当然合金可以涂以合适的保护性镀层，以此将碳化物留在亚表层的地方。

虽然所见的文献不多，但还是常设想非碳化物形成元素确实会影响碳化物的形成。例如钴被认为能改善镍-基合金中的碳化物，与仅单独存在于耐热铁-基合金里的碳相比，磷可形成更普通的、散布更匀的和粒度更细的碳化物析出。这种对于碳化物的改善效应可以是晶粒内的或是晶粒间的，这取决于改善剂和合金系统。

硼、锆和铪。通过加入硼、锆和铪能在一定程度上有效地提高力学性能。然而，也只能形成有限的显微组织间的相互关系。这些元素的存在可以改善初始晶界上的碳化物或束缚像硫、铅的一些有害元素，还可以此降低晶界上的扩散速率，从而遏制对碳化物团聚作用和蠕变开裂。铪有助于在铸造合金中生成更多的 γ-γ′共晶体，可以认为晶界上的共晶体（适量的）有利于合金的塑性。这些元素的作用仅限于镍-基和铁-镍-基合金，钴-基合金实际上并不含有它们。铪尤其能大大提高 CGDS 合金沿横向晶界的塑性。

加工工艺。主要有三种加工工艺的技术可用于控制超合金的性能。形变热加工可用于锻压镍-基和铁-镍-基合金，通过生成细小的晶粒并控制位错密度/形状来储存能量。由此使拉伸性能和 LCF（低周疲劳）得以提高。

第二种工艺路线就是利用粉末冶金技术，使产生的碳化物尺寸减小和材料的均质性提高，最终使抗疲劳性和断裂力学的寿命都得到改善。进而将其连同等温加工一起运用，按常规方法生产出强度非常高的、合金晶粒度为 ASTM 8～12 的合金，从而获得在疲劳寿命方面的特别效果（其主要效果在于合金的成形能力如 IN 100，按照一些标准工艺，它是不可锻造的）。

第三方面就是晶粒大小和形貌的铸造控制，特别借助于受控凝固。铸造合金的晶粒可形成得更加均匀一致，在某些情况里，减小晶粒的大小能提高疲劳和拉伸性能。定向的晶粒组织能改善强度（见图 2.8-17）。通过消除横向晶界以及为减少应变而使低模量方向成为有利取向，可以改善抗蠕变断裂性和抗疲劳性。极端的说，就是在 SC 合金中消除晶粒以期获得特别的蠕变断裂特性（见图 2.8-17）。

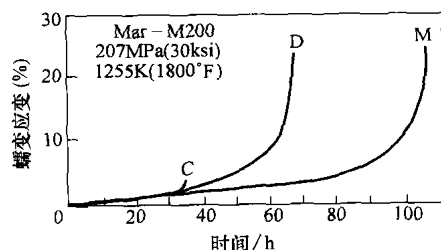


图 2.8-17　MAR-M200 合金，分别为多晶体常规铸造（C）、柱形晶粒方向性凝固（D）和单晶体方向性凝固（M）的蠕变性能的比较

超合金的疏松性会导致其疲劳和蠕变断裂失效。通过 HIP 来减少疏松能提高其性能。至今人们的努力都集中于镍-基铸造合金，但是这些工艺方法能增强任何具有非表面连接疏松的铸造合金的性能（在生物医学方面，使用 HIP 能明显提高维塔利［Vitallium］合金移植臀骨的疲劳寿命）。

热处置对力学性能的影响

超合金在试验和使用过程的热处置中所表现的一般特性非常像其他种类的合金系统，但是鉴于 γ′析出物的性质还是有一些不同之处的。具有二次硬化相的大部分合金会都由于二次相的粘合而遭受性能的下

降，即一种其功效降低的过程。超合金中的这种特性以γ′聚集和粗化的形式表现出来，同时产生碳化物析出并形成γ′包膜。此外，超合金还可能形成不太需要的，如σ的二次相。

一般这些有害的相会降低超合金的性能，这些相在合金中的形成是因为其固有的性质和/或为γ与γ′所需元素的消耗。其中一些相可以按照电子空位数N_v原理应用成分控制来避免其形成。据发现，tcp相，如σ、Laves和μ的形成与在过渡元素的母体金属(铁、镍和钴)里的过量电子空位有关。由于N_v是由γ基体的合金元素所引起的，故可用加权的N_v进行计算γ，并且可以通过实验为给定的合金成分设置N_v的上限值，以此保证在一合理的处置时间内不存在tcp相。遗憾的是这种简单的计算尚不能应用于δ、η的形成，它们的某些形态和/或过量都是有害的。一般要求使用成分和加工工艺的试错调整来保证不发生δ、η的析出和明显的性能下降。

除了形成单一有害的相以外，还有更为复杂的显微组织出现在镀层下。据报道N4和N5型的合金里有一种特定的二次反应区(SRZ)。这个反应区产生一个常因网状反应而形成的相变前沿，通过上述反应，在γ′相的基体里形成γ相和P相(大约50%的Re)。特别当SRZ形成在枝晶区域时，其强度大幅度降低。改进型的合金能防止这种复杂组织的形成，正如N_v控制能将有害的tcp相减少到最低限度。

硬化相的转变。在铁-镍-基超合金中，处于650～760℃(1200～1400℉)的适中温度区里的强化析出物性能通常会下降，形成一种强化合金不太有效的组织和析出物形态。在用大量钛硬化的合金里，η相代替γ′相。η相的析出以两种形式发生：在晶界上以网状形式或者在晶粒内以魏氏板条形式。网状析出往往造成力学性能的下降，特别是缺口的应力断裂(NSR)。晶粒内板块也会造成一些性能上的降低，但是没有数据来证明。据报道在某些较高钛/铝比的镍-基超合金(如IN 738、IN 792及IN 939)里有η相，但也没有见到有关性能降低方面的资料。

在一种镍-铌合金如IN 718里，要在高温中处置相当长的时间之后才会形成板条正交δ相。由于其相对粗大的形态，当有过量的板条状或针状的δ形成时，就会使性能下降。

过渡元素相的形成。在所有超合金中，对于各种有害的二次相的形成应予以很大的重视，它们与初次硬化析出相γ′和γ″并不直接相关。Laves相是在铁-镍-基超合金如IN 718、Incoloy 901和A-286里发现的。Laves相的形成会降低IN 718在室温下的屈服强度和塑性，而在A-286中的Laves并不影响性能。在钴-基合金L605里的Laves会大大降低其室温塑性。

一般的针形相如Laves、σ和μ，都是由于其形态、缺少塑性及某些硬化元素的束缚而造成的危害。现已表明，有多种的镍-基合金由于σ相的形成而缩短其应力断裂寿命(见图2.8-18)。σ一般都是在暴露时形成，并且通过设置成分极限值(相控制电子空位数,N_v)或通过防止合金在σ-形成的温度范围中运行对其进行控制。tcp及其他二次相对性能的影响程度依照合金的种类(铸造还是锻造)、所测定的性能、初始显微组织以及环境因素(有镀层还是无镀层、试验的气氛)而变。

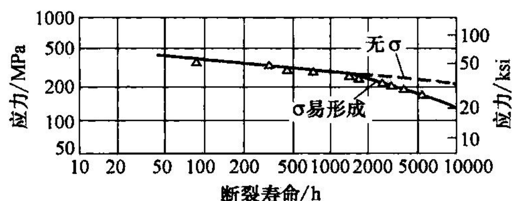


图2.8-18 U 700的应力断裂特性，图示为当σ相形成时会引起的强度下降。引自：参考文献[5](原始摘自参考文献[6])

γ′的形态变化。γ′在试验过程中的变化会对性能造成影响，由于同时发生其他显微组织的变化，故上述影响不易被观察到。最为普遍的是，γ′在蠕变断裂试验中按照一定的规律变化和聚集后变得粗大(见图2.8-19)，并趋向于在与作用应力相垂直的[001]平面上形成γ′的板条。γ′的粗化会造成断裂寿命的缩短(见图2.8-20)。过热会导致粗糙化以及一些细微的γ′固溶的加速进行。性能会因此有所降低，但是在其缓和的过热过程里会发生细微γ′的析出。

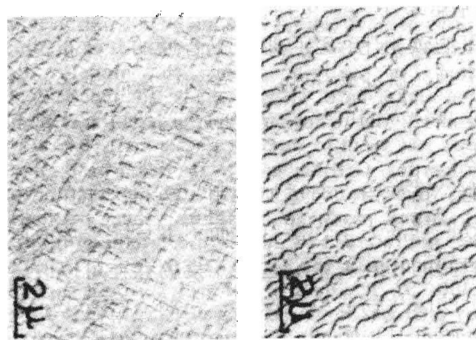


图2.8-19 Udimet700中通过蠕变试验生成的γ′聚集物。左图经热处理的照片，右图为在252.3MPa(36.6ksi)和893℃(1640℉)的条件下经91.2h的照片。4000×

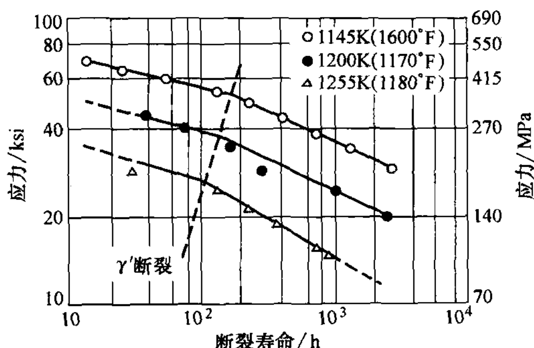


图2.8-20 B-1900镍-基超合金的应力断裂特性，所示的斜率折断可能为γ'粗化所致

碳化物的形态/类型变化。随处置时间的增加，会有初生MC碳化物的含量进一步降低及其形态发生进一步变化的趋势，并且伴有形成二次碳化物$M_{23}C_6$和M_6C的数量增加的趋势。如果形成碳化物膜和/或针形的M_6C型碳化物，则合金的塑性和强度就会降低。然而碳化物的聚集会导致塑性的提高，并伴随强度的下降。

在铸造钴-基超合金的使用过程中，若另有晶粒内碳化物的析出，将导致断裂强度的急剧提高和断裂塑性的下降。通过对另一种断裂寿命和塑性均降低的钴-基合金进行时效，会发生晶粒内针形魏氏碳化物的析出。

经热处置使性能恢复。如前所述，在高温中的处置会发生γ'的变化，最普遍的是，γ'的粗化和聚集化，尤其是在应力的作用下。过热会造成粗化以及一些细微γ'的固溶的加速进行。在这种情况下性能要下降，但是当过热变得缓和时，随其回到常温会发生细微的γ'析出，从而使一些性能得到恢复。然而就是对超合金中的tcp、δ或η另行热处置，也难以恢复其性能。无论是在碳化物的过度析出（在钴-基超合金中会发生）还是在γ'粗化的扩大（在镍-基和铁-镍-基超合金中会发生）之后，都无法再通过热处置使性能得到恢复。

常要求将性能的恢复作为延长零件寿命的一种方法。如上所述，如果另行热处置无法得到较好的性能，则要求通过重固溶处理和时效使性能恢复。然而这种工艺只是在合金仅由于热处置使性能下降的情况下才会奏效，在应力作用下的户外应用一般会导致性能下降（部分地由于气蚀或楔形蠕变开裂），为此单独采用一种简单的热处理是不能恢复的——至少对于较复杂的工业用超合金是这样的。在适当情况下，建议对户外用超合金采用HIP再加上重固溶和时效处理，可以使性能得到一些改善。这种补救性的工艺方法能否达到经济性适用的程度还不能确定。

超合金的典型力学性能

此处所谓“典型”的意思是指某一种性能在被随机地进行标准试验时最有可能达到的数值。典型的性能只不过是作为比较时的指南。必须精确地已知化学成分及性质、截面大小、热处理以及其他的工艺流程，才能形成设计所要的性能。表2.8-8和表2.8-9概括了锻压合金的性能特征。表2.8-10和表2.8-11则是铸造合金的类似数据。

表2.8-8 温度对锻压镍-、铁-和钴-基超合金性能的影响

合金	试件形式	抗拉强度						0.2%条件屈服强度						伸长率		
		21℃ (70℉)		540℃ (1000℉)		760℃ (1400℉)		21℃ (70℉)		540℃ (1000℉)		760℃ (1400℉)		21℃ (10℉)	540℃ (1000℉)	760℃ (1400℉)
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	%		
镍-基																
Astroloy	棒料	1415	205	1240	180	1160	168	1050	152	965	140	910	132	16	16	21
Cabot 214	—	915	133	715	104	560	84	560	81	510	74	495	72	38	19	9
D-979	棒料	1410	204	1295	188	720	104	1005	146	925	134	655	95	15	15	17
Hastelloy C-22	薄板	800	116	625	91	525	76	405	59	275	40	240	35	57	61	63
Hastelloy G-30	薄板	690	100	490	71	—	—	315	46	170	25	—	—	64	75	—
Hastelloy S	棒料	845	130	775	112	575	84	455	65	340	49	310	45	49	50	70
Hastelloy X	薄板	785	114	650	94	435	63	360	52	290	42	260	38	43	45	37

（续）

合金	试件形式	抗拉强度						0.2%条件屈服强度						伸长率		
		21℃（70℉）		540℃（1000℉）		760℃（1400℉）		21℃（70℉）		540℃（1000℉）		760℃（1400℉）		21℃（10℉）	540℃（1000℉）	760℃（1400℉）
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	%		
镍-基																
Hayhes 230	①,②	870	126	720	105	575	84	390	57	275	40	285	41	48	56	46
Inconel 587③	棒料	1180	171	1035	150	830	120	705	102	620	90	605	88	28	22	20
Inconel 597③	棒料	1220	177	1140	165	930	135	760	110	720	104	665	96	15	15	16
Inconel 600	棒料	660	96	560	81	260	38	285	41	220	32	180	26	45	41	70
Inconel 601	薄板	740	107	725	105	290	42	455	66	350	51	220	32	40	34	78
Inconel 617	棒料	740	107	580	84	440	64	295	43	200	29	180	26	70	68	84
Inconel 617	薄板	770	112	590	86	470	68	345	50	230	33	230	33	55	62	59
Inconel 625	棒料	965	140	910	132	550	80	490	71	415	60	415	60	50	50	45
Inconel 706	棒料	1310	190	1145	166	725	105	1005	146	910	132	660	96	20	19	32
Inconel 718	棒料	1435	208	1275	185	950	138	1185	172	1065	154	740	107	21	18	25
Inconel 718 直接时效	棒料	1530	222	1350	196	—	—	1365	198	1180	171	—	—	16	15	—
Inconel 718 Super	棒料	1350	196	1200	174	—	—	1105	160	1020	148	—	—	16	18	—
Inconel X750	棒料	1200	174	1050	152	—	—	815	118	725	105	—	—	27	26	—
M-252	棒料	1240	180	1230	178	945	137	840	122	765	111	720	104	16	15	10
Nimonic 75	棒料	745	108	675	98	310	45	285	41	200	29	160	23	40	40	67
Nimonic 80A	棒料	1000	145	875	127	600	87	620	90	530	77	505	73	39	37	17
Nimonic 90	棒料	1235	179	1075	156	655	95	810	117	725	105	540	78	33	28	12
Nimonic 105	棒料	1180	171	1130	164	930	135	830	120	775	112	740	107	16	22	25
Nimonic 115	棒料	1240	180	1090	158	1085	157	865	125	795	115	800	116	27	18	24
Nimonic 263	薄板	970	141	800	116	650	94	580	84	485	70	460	67	39	42	21
Nimonic 942③	棒料	1405	204	1300	189	900	131	1060	154	970	141	860	125	37	26	42
Nimonic PE. 11③	棒料	1080	157	1000	145	760	110	720	105	690	100	560	81	30	30	18
Nimonic PE. 16	棒料	885	128	740	107	510	74	530	77	485	70	370	54	37	26	42
Nimonic PK. 33	薄板	1180	171	1000	145	885	128	780	113	725	105	670	97	30	30	18
Pyromet 860③	棒料	1295	188	1255	182	910	132	835	121	840	122	835	121	22	15	18
René 41	棒料	1420	206	1400	203	1105	160	1060	154	1020	147	940	136	14	14	11
René 95	棒料	1620	235	1550	224	1170	170	1310	190	1255	182	1100	160	15	12	15
Udimet 400③	棒料	1310	190	1185	172	—	—	930	135	830	120	—	—	30	26	—
Udimet 500	棒料	1310	190	1240	180	1040	151	840	122	795	115	730	106	32	28	39
Udimet 520	棒料	1310	190	1240	180	725	105	860	125	825	120	725	105	21	20	15
Udimet 630③	棒料	1520	220	1380	200	965	140	1310	190	1170	170	860	125	15	15	5
Udimet 700	棒料	1410	204	1275	185	1035	150	965	140	895	130	825	120	17	16	20
Udimet 710	棒料	1185	172	1150	167	1020	148	910	132	850	123	815	118	7	10	25

（续）

合金	试件形式	抗拉强度						0.2%条件屈服强度						伸长率		
		21℃（70°F）		540℃（1000°F）		760℃（1400°F）		21℃（70°F）		540℃（1000°F）		760℃（1400°F）		21℃（10°F）	540℃（1000°F）	760℃（1400°F）
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	%		
镍-基																
Udimet 720	棒料	1570	228	—	—	1455	211	1195	173	—	—	1050	152	13	—	9
Unitemp AF2-1DA6	棒料	1560	226	1480	215	1290	187	1015	147	1040	151	995	144	20	19	16
Waspaloy	棒料	1275	185	1170	170	650	94	795	115	725	105	675	98	25	23	28
铁-基																
A-286	棒料	1005	146	905	131	440	64	725	105	605	88	430	62	25	19	19
Alloy 901	棒料	1205	175	1030	149	725	105	895	130	780	113	635	92	14	14	19
Discaloy	棒料	1000	145	865	125	485	70	730	106	650	94	430	62	19	16	—
Haynes 556	薄板	815	118	645	93	470	69	410	60	240	35	220	32	48	54	49
Incoloy 800③	棒料	595	86	510	74	235	34	250	36	180	26	150	22	44	38	83
Incoloy 801③	棒料	785	114	660	96	325	47	385	56	310	45	290	42	30	28	55
Incoloy 802③	棒料	690	100	600	87	400	58	290	42	195	28	200	29	44	39	15
Incoloy 807③	棒料	655	95	470	68	350	51	380	55	255	37	225	32.5	48	40	34
Incoloy 825④、⑤	—	690	100	~590	~86	~275	~40	310	45	~234	~34	180	~26	45	~44	~86
Incoloy 903	棒料	1310	190	—	—	—	—	1105	160	—	—	—	—	14	—	—
Incoloy 907④、⑥	—	~1365	~198	~1205	~175	~655	~95	~1110	~161	~960	~139	~565	~82	~12	~11	~20
Incoloy 909	棒料	1310	190	1160	168	615	89	1020	148	945	137	540	78	16	14	34
N-155	棒料	815	118	650	94	428	62	400	58	340	49	250	36	40	33	32
V-57	棒料	1170	170	1000	145	620	90	830	120	760	110	485	70	26	19	34
19-9 DL	—	815	118	615	89	—	—	570	83	395	57	—	—	43	30	—
16-25-6⑦	—	980	142	—	—	415	60	770	112	—	—	345	50	23	—	11
钴-基																
AirResist 213⑧	—	1120	162	—	—	485	70	625	91	—	—	385	56	14	—	47
Elgiloy⑧	—	690⑤ ~ 2480⑨	100⑤ ~ 360⑨	—	—	—	—	480⑤ ~ 2000⑨	70 ~ 290	—	—	—	—	34	—	—
Haynes 188	薄板	960	139	740	107	635	92	485	70	305	44	290	42	56	70	43
L-605	薄板	1005	146	800	116	455	66	460	67	250	36	260	38	64	59	12
MAR-M918	薄板	895	130	—	—	—	—	895	130	—	—	—	—	48	—	—
MP 35N	棒料	2025	294	—	—	—	—	1620	235	—	—	—	—	10	—	—
MP 159	棒料	1895	275	1565	227	—	—	1825	265	1495	217	—	—	8	8	—
Stellite6B⑧	薄板	1010	146	—	—	—	—	635	92	—	—	—	—	11	—	—
Haynes 150⑧	—	925	134	—	—	—	—	317	46	—	—	—	—	8	—	—

①冷轧和固溶退火薄板，1.2~1.6mm(0.048 ~0.063in)厚。 ②参考文献[11]。 ③参考文献[7]。 ④参考文献[8]。 ⑤退火。 ⑥析出淬火。 ⑦参考文献[9]。 ⑧参考文献[10]。 ⑨形变加工强化和时效。

引自参考文献[12]，另有注明者除外。

表 2.8-9　锻压镍-、铁-和钴-基超合金的1000小时断裂强度

合　　金	试件形式	断裂强度							
		650℃(1200℉)		760(1400℉)		870(1600℉)		980℃(1800℉)	
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
镍-基									
Astroloy	棒材	770	112	425	62	170	25	55	8
Cabot 214	—	—	—	—	—	30	4	15	2
D-979	棒材	515	75	250	36	70	10	—	—
Hastelloy S	棒材	—	—	90	13	25	4	—	—
Hastelloy X	薄板	215	31	105	15	40	6	15	2
Haynes 230	—	—	—	125	18	55	8	15	2
Inconel 587①	棒材	—	—	285	41	—	—	—	—
Inconel 597①	棒材	—	—	340	49	—	—	—	—
Inconel 600	棒材	—	—	—	—	30	4	15	2
Inconel 601	薄板	195	28	60	9	30	4	15	2
Inconel 617	棒材	360	52	165	24	60	9	30	4
Inconel 617	薄板	—	—	160	23	60	9	30	4
Inconel 625	棒材	370	54	160	23	50	7	20	3
Inconel 706	棒材	580	84	—	—	—	—	—	—
Inconel 718	棒材	595	86	195	28	—	—	—	—
Inconel 718 直接时效	棒材	405	59	—	—	—	—	—	—
Inconel 718 Super	棒材	600	87	—	—	—	—	—	—
Inconel X750	棒材	470	68	—	—	50	7	—	—
M-252	棒材	565	82	270	39	95	14	—	—
Nimonic 75	棒材	170	25	50	7	5	1	—	—
Nimonic 80A	棒材	420	61	160	23	—	—	—	—
Nimonic 90	棒材	455	66	205	30	60	9	—	—
Nimonic 105	棒材	—	—	330	48	130	19	30	4
Nimonic 115	棒材	—	—	420	61	185	27	70	10
Nimonic 942①	棒材	520	75	270	39	—	—	—	—
Nimonic PE. 11①	棒材	335	49	145	21	—	—	—	—
Nimonic PE. 16	棒材	345	50	150	22	—	—	—	—
Nimonic PK. 33	薄板	655	95	310	45	90	13	—	—
Pyromet 860①	棒材	545	79	250	36	—	—	—	—
René 41	棒材	705	102	345	50	115	17	—	—
René 95	棒材	860	125	—	—	—	—	—	—
Udimet 400①	棒材	600	87	305	44	110	16	—	—
Udimet 500	棒材	760	110	325	47	125	18	—	—
Udimet 520	棒材	585	85	345	50	150	22	—	—

（续）

合金	试件形式	断裂强度							
		650℃(1200℉)		760(1400℉)		870(1600℉)		980℃(1800℉)	
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
镍-基									
Udimet 700	棒材	705	102	425	62	200	29	55	8
Udimet 710	棒材	870	126	460	67	200	29	70	10
Udimet 720	棒材	670	97	—	—	—	—	—	—
Unitemp AF2-1DA6	棒材	885	128	360	52	—	—	—	—
Waspaloy	棒材	615	89	290	42	110	16	—	—
铁-基									
A-286	棒材	315	46	105	15	—	—	—	—
Alloy 901	薄板	525	76	205	30	—	—	—	—
Discaloy	棒材	275	40	60	9	—	—	—	—
Haynes 556	薄板	275	40	125	18	55	8	20	3
Incoloy 800①	棒材	165	24	66	9.5	30	4.4	13	1.9
Incoloy 801①	棒材	—	—	—	—	—	—	—	—
Incoloy 802①	棒材	170	25	110	16	69	10	24	3.5
Incoloy 807①	棒材	—	—	105	15	43	6.2	19	2.7
Incoloy 903	棒材	510	74	—	—	—	—	—	—
Incoloy 909	棒材	345	50	—	—	—	—	—	—
N-155	棒材	295	43	140	20	70	10	20	3
V-57	棒材	485	70	—	—	—	—	—	—
钴-基									
Haynes 188	薄板	—	—	165	24	70	10	30	4
L-605	薄板	270	39	165	24	75	11	30	4
MAR-M 918	薄板	—	—	60	9	20	3	5	1
Haynes 150②	—	—	—	40③	5.8	—	—	—	—

①参考文献[7]。 ②参考文献[9]。 ③温度为815℃(1500℉)。

引自参考文献[12]，另有注明者除外。

表2.8-10 温度对铸造镍-基及和钴-基合金力学性能的影响

合金	抗拉强度						0.2%条件屈服强度						伸长率(%)		
	21℃(70℉)		538℃(1000℉)		1093℃(2000℉)		540℃(1000℉)		760℃(1400℉)		1093℃(2000℉)		21℃(70℉)	540℃(1000℉)	760℃(1400℉)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	%		
镍-基															
IN-713C	850	123	860	125	—	—	740	107	705	102	—	—	8	10	—
IN-713LC	895	130	895	130	—	—	750	109	760	110	—	—	15	11	—

（续）

合金	抗拉强度						0.2%条件屈服强度						伸长率(%)		
	21℃ (70℉)		538℃ (1000℉)		1093℃ (2000℉)		540℃ (1000℉)		760℃ (1400℉)		1093℃ (2000℉)		21℃ (70℉)	540℃ (1000℉)	760℃ (1400℉)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	%		
镍-基															
B-1900	970	141	1005	146	270	38	825	120	870	126	195	28	8	7	11
IN-625	710	103	510	74	—	—	350	51	235	34	—	—	48	50	—
IN-718	1090	158	—	—	—	—	915	133	—	—	—	—	11	—	—
IN-100	1018	147	1090	150	(380)	(55)	850	123	885	128	(240)	(35)	9	9	—
IN-162	1005	146	1020	148	—	—	815	118	795	115	—	—	7	6.5	—
IN-731	835	121	—	—	275	40	725	105	—	—	170	25	6.5	—	—
IN-738	1095	159	—	—	—	—	950	138	—	—	—	—	—	—	—
IN-792	1170	170	—	—	—	—	1060	154	—	—	—	—	4	—	—
M-22	730	106	780	113	—	—	685	99	730	106	—	—	5.5	4.5	—
MAR-M200	930	135	945	137	325	47	840	122	880	123	—	—	7	5	—
MAR-M246	965	140	1000	145	345	50	860	125	860	125	—	—	5	5	—
MAR-M247	965	140	1035	150	—	—	815	118	825	120	—	—	7	—	—
MAR-M421	1085	157	995	147	—	—	930	135	815	118	—	—	4.5	3	—
MAR-M432	1240	180	1105	160	—	—	1070	155	910	132	—	—	6	—	—
MC-102	675	98	655	95	—	—	605	88	540	78	—	—	5	9	—
Nimocast 75	500	72	—	—	—	—	179	26	—	—	—	—	39	—	—
Nimocast 80	730	106	—	—	—	—	520	75	—	—	—	—	15	—	—
Nimocast 90	700	102	595	86	—	—	520	75	420	61	—	—	14	15	—
Nimocast 242	460	67	—	—	—	—	300	44	—	—	—	—	8	—	—
Nimocast 263	730	106	—	—	—	—	510	74	—	—	—	—	18	—	—
René 77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
René 80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Udimet 500	930	135	895	130	—	—	815	118	725	105	—	—	13	13	—
Udimet 710	1075	156	—	—	240	35	895	130	—	—	170	25	8	—	—
CMSX-2①,②	1185	172	1295③	188③	—	—	1135	165	1245③	181③	—	—	10	17③	—
GMR-235②	710	103	—	—	—	—	640	93	—	—	—	—	3	—	18④
IN-939②	1050	152	915③	133③	325④	47④	800	116	635③	92③	205④	30④	5	7③	25④
MM002②,⑤	1035	150	1035③	150③	550④	80④	825	120	860③	125③	345④	50④	7	5③	12④
IN-713Hf②,⑥	1000	145	895③	130③	380④	55④	760	110	620③	90③	240④	35④	11	6③	20④
René 125Hf②,⑦	1070	155	1070③	155③	550④	80④	825	120	860③	125③	345④	50④	5	5③	12④
MAR-M246 Hf②,⑧	1105	160	1070③	155③	565④	82④	860	125	860③	125③	345④	50④	6	7③	14④
MAR-M200 Hf②,⑨	1035	150	1035③	150③	540④	78④	825	120	860③	125③	345④	50④	5	5③	10④
PWA-1480①,②	—	—	1130③	164③	685④	99④	895	130	905③	131③	495④	72④	4	8③	20④

（续）

合 金	抗拉强度 21℃ (70℉) MPa	ksi	538℃ (1000℉) MPa	ksi	1093℃ (2000℉) MPa	ksi	0.2%条件屈服强度 540℃ (1000℉) MPa	ksi	760℃ (1400℉) MPa	ksi	1093℃ (2000℉) MPa	ksi	伸长率(%) 21℃ (70℉)	540℃ (1000℉)	760℃ (1400℉)
镍-基															
SEL②	1020	148	875③	127③	—	—	905	131	795③	115③	—	—	6	7③	—
UDM56②	945	137	945③	137③	—	—	850	123	725③	105③	—	—	3	5③	—
SEL-15②	1060	154	1090③	158③	—	—	895	130	815③	118③	—	—	9	5③	—
钴-基															
AiResist 13⑩	600	87	420③	61③	—	—	530	77	330③	48③	—	—	1.5	4.5③	—
AiResist 215⑩	690	100	570⑪	83⑪	—	—	485	70	315⑪	46⑪	—	—	4	12⑪	—
FSX-414	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Haynes 1002	770	112	560	81	115	17	470	68	345	50	95	14	6	8	28
MAR-M302	930	135	795	115	150	22	690	100	505	73	150	22	2	—	21
MAR-M322⑩	830	120	595③	86③	—	—	630	91	345③	50③	—	—	4	6.5③	—
MAR-M509	785	114	570	83	—	—	570	83	400	58	—	—	4	6	—
WI-52	750	109	745	108	160	23	585	85	440	64	105	15	5	7	35
X-40	745	108	550	80	—	—	525	76	275	40	—	—	9	17	—

①单晶[001]。 ②数据引自参考文献[12]。 ③温度为760℃(1400℉)。 ④温度为980℃(1800℉)。 ⑤RR-7080。 ⑥MM004。 ⑦M005。 ⑧MM006。 ⑨MM009。 ⑩数据引自《金属手册》卷3，第9版，1980。 ⑪温度为650℃(1200℉)。

引自镍开发研究所，另有注明除外。

表 2.8-11 所选的铸造镍-基超合金应力断裂强度

合 金	断裂强度 815℃(1500℉) 100h MPa(ksi)	815℃(1500℉) 1000h MPa(ksi)	870℃(1600℉) 100h MPa(ksi)	870℃(1600℉) 1000h MPa(ksi)	980℃(1800℉) 100h MPa(ksi)	980℃(1800℉) 1000h MPa(ksi)
镍-基						
IN-713LC	425(62)	325(47)	295(43)	240(35)	140(20)	105(15)
IN-713C	370(54)	305(44)	305(44)	215(31)	130(19)	70(10)
IN-738C	470(68)	345(50)	330(48)	235(34)	130(19)	90(13)
IN-738LC	430(62)①	315(46)	295(43)①	215(31)	140(20)①	90(13)
IN-100	455(66)	365(53)	360(52)	260(38)	160(23)	90(13)
MAR-M247(MM0011)	585(85)	415(60)	455(66)	290(42)	185(27)	125(18)
MAR-M246①	525(76)	435(62)	440(63)	290(42)	195(28)	125(18)
MAR-M246 Hf(MM006)	530(77)	425(62)	425(62)	285(41)	205(30)	130(19)
MAR-M200	495(72)①	415(60)①	385(56)①	295(43)①	170(25)	125(18)
MAR-M200Hf(MM009)②	—	—	—	305(44)	—	125(18)

（续）

合　金	断裂强度					
	815℃(1500℉)		870℃(1600℉)		980℃(1800℉)	
	100h MPa(ksi)	1000h MPa(ksi)	100h MPa(ksi)	1000h MPa(ksi)	100h MPa(ksi)	1000h MPa(ksi)
镍-基						
B-1900	510(74)	380(55)	385(56)	250(36)	180(26)	110(16)
René 77①	—	—	310(45)	215(31.5)	130(19)	62(9.0)
René 80	—	—	350(51)	240(35)	160(23)	105(15)
IN-625①	130(19)	110(16)	97(14)	76(11)	34(5)	28(4)
IN-162①	505(73)	370(54)	340(49)	255(37)	165(24)	110(16)
IN-731①	505(73)	365(53)	—	—	165(24)	105(15)
IN-792①	515(75)	380(55)	365(53)	260(38)	165(24)	105(15)
M-22①	515(75)	385(56)	395(57)	285(41)	200(29)	130(19)
MAR-M421①	450(65)	305(44)	310(46)	215(31)	125(18)	83(12)
MAR-M432①	435(63)	330(48)	295(40)	215(31)	140(20)	97(14)
MC-102①	195(28)	145(21)	145(21)	105(15)	—	—
Nimocast 90①	160(23)	110(17)	125(18)	83(12)	—	—
Nimocast 242①	110(16)	83(12)	90(13)	59(8.6)	45(6.5)	—
Udimet 500①	330(48)	240(35)	230(33)	165(24)	90(13)	—
Udimet 710①	420(61)	325(47)	305(44)	215(31)	150(22)	76(11)
CMSX-2②	—	—	—	345(50)	—	170(25)
GMR-235②	—	—	—	180(26)	—	75(11)
IN-939②	—	—	—	195(28)	—	60(9)
MM 002②	—	—	—	305(44)	—	125(18)
IN-713 Hf(MM004)②	—	—	—	205(30)	—	90(13)
René 125Hf(MM005)②	—	—	—	305(44)	—	115(17)
SEL-15②	—	—	—	295(43)	—	75(11)
UDM 56②	—	—	—	270(39)	—	125(18)
钴-基						
HS-21	150(22)	95(14)	115(17)	90(13)	60(9)	50(7)
X-40(HS-31)	180(26)	140(20)	130(19)	105(15)	75(11)	55(8)
MAR-M509	270(39)	225(33)	200(29)	140(20)	115(17)	90(13)
FSX 414	150(22)	115(17)	110(16)	85(12)	55(8)	35(5)
WI-52	—	195(28)	175(25)	150(22)	90(13)	70(10)

①参考文献[12]。　②参考文献[13]。

环境因素

一般性氧化

超合金一般都会发生氧化反应，而且氧化是这些合金的主要环境因素。在中等的温度——约 870℃(1600℉)及其以下，其一般的均匀氧化不会成为主要问题。到较高的温度时，工业用的镍-基和钴-基超合金要遭受氧的侵蚀。低于约 980℃(1800℉)的抗氧化能力取决于其含铬量(Cr_2O_3 作为一种保护性氧化物而形成)，高于约 980℃(1800℉)的含铝量在抗氧化中显得尤为重要(Al_2O_3 作为一种保护性氧化物而形成)。铬和铝能以一种互动的方式有利于氧化保护。含铬量越高，要求形成高保护层 Al_2O_3 的含铝量越少。然而为得到长期的 Al_2O_3 保护，许多超合金所含有的含铝量都是不足的，所以需使用保护性镀层(见下文)。这些镀层还可以防止发生于晶界和表面碳化物上的选择性侵蚀(见图 2.8-21)，并阻止内部氧化或与 γ'包络着的亚表层 O_2/N_2 相互作用，相信这是发生在镍-基超合金内的一种过程。

热蚀

在较低温度，即≤870℃(≤1600℉)的运行条件下，超合金通过所选助熔剂的作用加速在气道里发生的氧化。热蚀(有时也称为硫化)是文献中常见的加速氧化过程之一。热蚀的过程分为低温和高温两个部分。防止发生热蚀的主要方法就是在母合金中使用高含铬量($w(Cr)\geq 20\%$)。虽然钴-基超合金和许多铁-镍-基合金都有这个范围的含铬量，而大部分镍-基合金——特别是具有高蠕变断裂强度的——却没有这样的含量，因为高铬含量与其所要求的高 $V_f\gamma'$不相容。

较高的钛/铝似乎也能降低对未经镀层的超合金的侵蚀，现在已能通过稍微增加一些铬含量和适当的钛/铝改性，生产使耐热蚀得到提高的合金。然而为了达到非镀层的最强耐热蚀性，需要求 $w(Cr)$ 达到 20%以上。这种合金达不到像 MAR-M247 这样的高 $V_f\gamma'$合金所具有的强度。因而能保护母材金属的镀层(外敷型镀层也许是所能够提供的最佳表面保护)，或有时使用的环境防蚀剂，都可用于遏制高强度(高 $V_f\gamma'$)镍-基超合金的热蚀发生。

镀层

开发高强度(经提高的 $V_f\gamma'$)的镍-基超合金就要导致含铬量降低，还会遭受更大的氧化侵蚀和热蚀敏感性。虽然为了增强抗氧化性而增加某些合金的铝含量，但随工作温度的升高，晶间和碳化物的侵蚀会变得更糟。进而，还发现一些抗氧化性较强的合金，其抗热蚀性却非常差。为了防止局部氧化及之后的抗热蚀和类似的助熔反应，超合金都采用镀层处理。近年来开发的热障镀层(TBCs)能使超合金表面温度有相当的降低。这些镀层通常与防腐蚀保护性镀层结合使用。

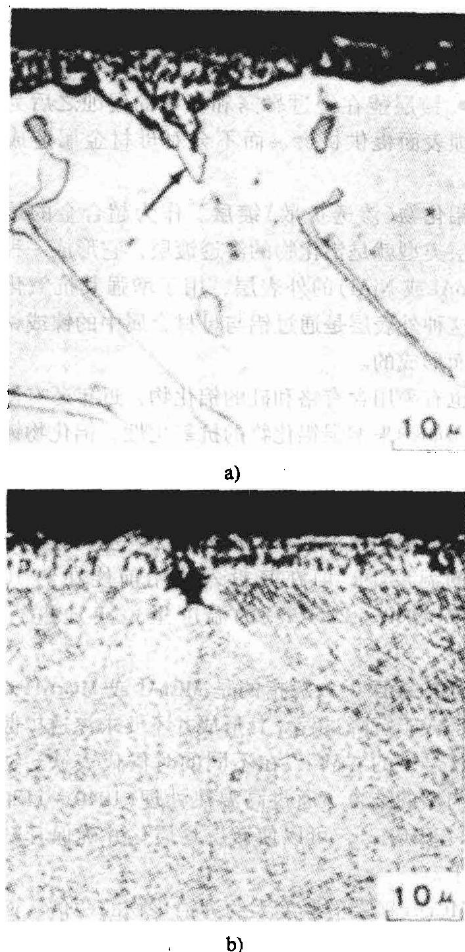


图 2.8-21 氧化对超耐热合金的影响
a) 在 925℃(1700℉)的温度下 MAR-M200 表面上所发生的 MC 碳化物(箭头所指)的加速氧化
b) 在 760℃(1400℉)的温度下 Udimet 700 晶界上所发生的加速氧化。1000×

有两种类型的镀层：铝化物(渗透)镀层和涂敷镀层。使用镀层是为了保护超合金表面不受环境侵蚀的优先选用方法，因为：

- 镀层(起码是外敷型镀层)可以针对预期有害

的环境进行处置。

● 母材金属在强度方面的开发可以少受防腐蚀方面的制约，因为其主要的保护(但不是全部的保护)是由镀层承担的。

● 镀层能在经过暴露和环境的侵蚀之后为其修复磨损表面提供机会，而不会对母材金属造成大的损害。

铝化物(渗透扩散)镀层。作为超合金的最常见的镀层类型就是铝化物的渗透镀层，它形成一种铝化物(CoAl 或 NiAl)的外表层，用于增强其抗氧化的能力。这种外表层是通过铝与母材金属中的镍或钴发生反应而形成的。

也有采用含有铬和硅的铝化物，近年还有使用贵重金属如铂来增强铝化物的抗氧化性。铝化物镀层的抗氧化性是来自于保护性 Al_2O_3 外皮的形成。铝化物渗透层一般很薄——约 50～75μm(2～3mil)。它们在其形成过程中要消耗一点母材金属，虽然它们沉积于较低的温度下，但在其投入使用前能在约 1040～1120℃(1900～2050℉)的温度里恒定地进行渗透扩散。

外敷镀层。一般指的是 MCrAl 或 MCrAlY 镀层，直接形成于沉降过程。其形成并不要求渗透扩散。在这些代号中的“M”，在不同的时候代表铁、钴、镍或镍与钴的结合。通过高温热处理(1040～1120℃或1900～2050℉)，可以使镀层均质化并确保其粘附于基体上。

MCrAl 镀层的厚度大约为铝化物的两倍，而且通过加入钇可以使这种外敷镀层的耐腐蚀性得到改善。MCrAlY 镀层的一个优点就是能通过调整成分，即增加或减少铬或铝在镀层内的含量达到其保护性和力学性能之间的平衡，从而使其总体性能为最佳。

热障镀层。它能在环境超过其常规的运行温度，即高达 165℃(300℉)以上时为超合金提供足够的隔热效应。TBCs 是一种陶瓷，最引人注目的是经等离子喷涂和部分稳定化后的氧化锆(PSZ)。这种陶瓷镀层使用一种耐腐蚀保护层的衬底——如 MCrAlY 的外敷镀层，由其提供抗氧化性和表面涂料粘附所必要的粗糙度。热障镀层并不能为超合金提供抗氧化保护。

镀层对机械特性的影响。镀层看似不会对拉伸和蠕变断裂产生负面影响。事实上，蠕变断裂寿命可以通过保护超合金表面不受氧化或助熔剂的侵蚀而得到延长。热机械疲劳(TMF)会受镀层很大的影响，因为镀层的塑性在低温下会变低。在较低的温度(≤540℃或 1000℉)下，铝化物镀层的塑性低于其外敷镀层。然而，外敷和渗透的两种镀层的塑性都会在较高的温度(≥650℃或 1200℉)下而急剧提高。当 TMF 循环在较低的温度下达到拉伸应变的峰值时，其镀层就会在最初的几个循环周里发生开裂，并且 TMF 所造成的后果与母材金属里的裂纹扩展速率有关。对塑性进行一些调整是可行的，尤其是外敷镀层。但是由于铝是保护性元素而成为塑性降低的主要原因，所以必须在保护性与耐 TMF 能力之间进行权衡。

镀层工艺。一般采用包埋法进行铝化物渗透镀层，但是也有采用稀浆法、电泳法和其他技术的。习惯上，沉积都是在中温下进行，然后在可控气氛炉里以约 1040～1120℃(1900～2050℉)的温度进行渗透扩散。

外敷镀层是在真空室里采用物理气相沉积(PVD)方法得到。它们也可以用等离子喷涂技术获得。低压等离子喷涂(LPPS)技术能产生与 PVD 真空技术所产生的性能相当的甚至更好的镀层(针对最早应用的空气等离子喷涂工艺,现在在 LPPS 中使用氩气)。低压等离子喷涂已成为应用于 TBCs 的主要方法之一。

外敷镀层正趋向成为令人瞩目的镀层，而包埋渗透镀层却不会。等离子喷涂技术在外敷镀层中的应用比 PVD 技术具有更大的适应性，因为在等离子与零件之间的角度关系可以在一个很大的包络中或大或小地变化，以便将镀层引向所需要的面上。等离子喷涂还有比 PVD 更多的调整成分的可能性。

防腐蚀镀层的一般要求。根据在实验室、试制车间和现场试验所掌握的有关氧化/腐蚀性状的知识来选择镀层。为正确选择镀层可能需要考虑的一些特性包括：

● 高抗氧化和/或热蚀的能力；

● 为了获得适当的抗热机械疲劳(TMF)能力，应有充分的塑性；

● 与母材金属的兼容性；

● 与母材合金有低的相互渗透扩散率；

● 容易应用和为提高零件寿命的相对成本低；

● 镀层的剥除和再镀能力，而且母材金属的尺寸不会发生明显的缩小或其性能也不会有降低。

其他环境因素

在较低的温度里，镍-基和铁-镍-基超合金会发生应力腐蚀开裂。这些合金在低温下发生的氢脆也有可见文献。进而，在所谓的惰性环境——例如真空或像氦气和氩气的气体——里的力学性能与其未经镀层的原始性能有相当大的不同，后者通常都是从稳态的空气试验中测得的。

参考文献

[1] G.E. Maurer, Primary and Secondary Melt Processing—Superalloys, *Superalloys, Supercomposites and Superceramics*, Academic Press, 1989, p 49–97.
[2] R. Galipeau and R. Sjoblad, *Mater. Eng.*, Sept 1967.
[3] C.R. Brooks, *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, American Society for Metals, 1982.
[4] C.T. Sims, "Nickel Alloys—The Heart of Gas Turbine Engines," Paper 70-GT-24, American Society of Mechanical Engineers, 1970.
[5] M.J. Donachie, Overheating, Creep and Alloy Stability, *Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals*, Vol 3, 9th ed., *Metals Handbook*, American Society for Metals, 1980, p 220–229.
[6] D.M. Moon and F.J. Wall, The Effect of Phase Instability on the High Temperature Stress Rupture Properties of Representative Nickel Base Superalloys, *Int. Symp. Structural Stability in Superalloys*, Vol 1, TMS-AIME, 1968, p 115–133.
[7] "High-Temperature High-Strength Nickel Base Alloys," Inco Alloys International Ltd., distributed by Nickel Development Institute.
[8] "Product Handbook," Publication 1A1-38, Inco Alloys International Inc., 1988.
[9] *Materials Selector 1988*, Penton, 1987.
[10] F.R. Morral, Ed., Wrought Superalloys, *Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals*, Vol 3, 9th ed., *Metals Handbook*, American Society for Metals, 1980.
[11] Alloy 230 product literature, Haynes International.
[12] Appendix B, compiled by T.P. Gabb and R.L. Dreshfield, *Superalloys II*, C.T. Sims, N.S. Stoloff, and W.C. Hagel, Ed., John Wiley & Sons, 1987, p 575–596.
[13] R.W. Fawley, Superalloy Progress, *The Superalloys*, C.T. Sims and W.C. Hagel, Ed., John Wiley & Sons, 1972, p 12.

精选参考文献

General

- J.R. Davis, Ed., *Heat-Resistant Materials*, ASM International, 1997.
- K.P. Rohrbach, Trends in High-Temperature Alloys, *Adv. Mater. & Process.*, Vol 148 (No. 10), 1995, p 37–40.
- Chapters on heat-resistant materials and superalloys in *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 950–1006.
- C.T. Sims, N.S. Stoloff, and W.C. Hagel, Ed., *Superalloys II*, John Wiley & Sons, 1987.
- M.J. Donachie, Ed., *Superalloys Source Book*, American Society for Metals, 1984.
- W. Betteridge and J. Heslop, Ed., *The Nimonic Alloys*, 2nd ed., Crane, Russak and Co., 1974.
- C.T. Sims and W.C. Hagel, Ed., *The Superalloys*, John Wiley & Sons, 1972.

第3篇　非铁合金和特殊用途材料

第1章　铝和铝合金

本章引自《ASM手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，3~215页；《ASM特种手册》铝和铝合金，1993，3~159页和《ASM手册》第13卷腐蚀，1987，583~609页。最新的统计资料和性能数据则摘自铝业联合协会。

第1节　铝和铝合金引论

铝及其合金由于其独特的性能组合而成为适应用途范围广、最具通用性和经济性的金属材料之一——从软的、高塑性的包装用铝箔到要求极高的工程用途。铝是仅次于钢的第二种结构材料。

铝的密度只有2.7g/cm^3，约为钢的密度(7.83g/cm^3)的1/3。1ft^3 钢的重量约为490lb，而1ft^3 铝的重量约为170lb。如此轻的重量加上某些铝合金的高强度(超过结构钢)，使得用于设计和建造强而轻的结构成为可能，它们对于任何航空和航天的运载工具以及所有陆上和水中的交通工具都具有特别的优势。

铝能抵御渐进式的氧化。这种氧化会造成钢的锈蚀。铝的外露表面与氧生成一种仅1×10^{-5}in厚的惰性氧化铝薄膜，以此阻止氧化的进一步发生。而且，氧化铝膜不像铁锈，会剥落让新的表面暴露、继续氧化。如果铝的保护层被刮伤，它会立即自动愈合。

这种薄的氧化膜紧紧地粘附于金属，而且它是无色和透明的，故肉眼看不到。钢和铁的锈蚀所发生的变色和剥落对于铝是不会发生的。

铝经过适当的合金化和处理，能耐水、盐和其他环境因素的腐蚀，以及其他很大范围里的化学和物理介质引起的腐蚀。本章第10节将详细讨论铝的腐蚀特征。

铝表面具有高反射性。辐射能、可见光、辐射热和电磁波都能有效地被反射，且经阳极化和深色阳极化处理的铝表面也可以反射或吸收它们。抛光铝的反射能在很大的波长范围里被按照不同的装饰性和功能性的应用需求进行选择。

虽然铝一般都表现出优异的电导率和热导率，但是还是要开发具有高电阻率的特种铝合金。这些铝合金对于例如高转矩电动机是十分有用的。铝常常因其高电导率而得到选用，在同样的重量下几乎是铜的两倍。使用长线、高压、钢芯增强的铝输送电缆均可满足对高电导率和高机械强度的要求。铝合金的热导率约为铜的50%~60%，故具有在换热器、蒸发器、电加热器具和用具，以及汽车缸盖和散热器上应用的优势。

铝是非电磁性的，这也是电气和电子工业所需要的一项重要性能。它不会引发火花，这对涉及处理或放置一些易燃或易爆材料的用途是很重要的。铝还是无毒的，常应用于食物和饮料的容器。利用普通精加工就能让它获得诱人的外观，可以是柔滑而有光泽或光亮而带闪烁的。实际上还可以让它带有任何颜色和质感。

铝易于加工成任意形状也是其最重要的特点之一。与一些成形加工性较差的廉价材料相比，它在竞争上具有更多的优势。作为金属，还能以已知的所有方法对其进行铸造。它可以轧制成任意厚度直至比纸还薄的铝箔。铝薄板可以冲压、拉拔、旋压或轧制成形。其金属还可捶击或锻打。用轧制的棒材拉制而成的铝线可以绞合成任意要求的尺寸和类型。至于其金属能挤压成的不同断面轮廓(形状)几乎不受任何限制。

铝工业

粗铝生产。一切铝业生产都是以电解冶炼法(Hall-Héroult Process)为基础的。用铝土矿提炼得到的氧化铝被溶解在加入了不同种类的氟化物盐，用于控制电解槽的温度、密度、电阻和氧化铝的溶解度。随后让电流通过电解液，用于电解被溶解的氧化铝，此时在碳阳极上发生反应并产生氧气，而铝则作为金属从其阴极板上进行采集。利用虹吸或真空的方法将分离的金属周期地移送至坩埚里，然后将其转送到浇铸设备里进行铸锭的重熔或铸造生产。

铝液里所含的杂质主要为铁和硅，锌、镓、钛和钒通常作为微量的污染物而存在。在国际上，将最低铝纯度作为定义其成分和价值的主要指标。在美国，已逐渐习惯将铁和硅的相对含量考虑成较为重要的指标。因此其非合金化金属的牌号可以仅按纯度进行识别，例如99.70%铝；或者用铝业协会规定的方法，即以标准化牌号 *Pxxx* 进行识别。在后者中，字母P后面跟随的数字分别代表硅和铁的最大百分比值(质量分数)的小数数字。例如，P1020代表一种熔炉生产的含有(质量分数)不超过0.10% Si和不超过0.20% Fe的非合金金属；P0506表示牌号中含有(质量分数)不超过0.05% Si和不超过0.06% Fe。普通的P牌号范围为P0202至P1535之间，为控制质量，每一种又规定了其他杂质的限量。

采用精炼工艺可以达到高得多的纯度。通过分级结晶或三层液铝电解精炼工艺(Hoopes cell operation)可以达到99.99%的纯度。第二种工艺是一种三层电解工艺，它使用比纯熔化铝密度更大的熔盐。这些提纯技术的结合可以使纯度达到99.999%，以满足极特殊用途的需要。

回收铝。很多年以来，利用废料回收的铝(回收铝)都是铝金属供应中的一个重要来源。新废料是指工厂在制造成品过程中产生的废料，而老废料则是指从消费者使用过的金属中所回收的废料。此外，在轧制过程的不同阶段所产生的大量废料都是要回收的。近年来，出于对能源供应的日益关注及其在经济上的意义，铝因为其生产高能耗的特点，其回收利用更加为人们所关心。在为重复使用而制造之前，重熔回收铝所需要的能量只有生产新铝所需要的5%，所以回收正在不断增加。尤其是饮料铝罐的回收，在过去的二十年里增加了许多倍。1996年美国差不多回收了89.3万t的丢弃饮料罐。这占到铝罐用量的63.5%。有些国家如瑞典，其回收率高达80%以上。

对于某些用途，回收铝合金要经过处理去除一些杂质或合金元素。在去除的合金元素里主要是镁，它在回收铝中的含量常超过用它生产的合金所要求的含量。镁通常通过用氯气或卤化物盐助熔予以去除。有关回收铝再生的更详细的内容可参阅本手册(下册)第4篇第10章。

生产与市场。1996年世界粗铝的总产量为2067万t。在其上一个十年里，世界生产的平均年增长率为2.1%。1996年，美国占世界产量的17.3%，而欧盟占10.7%。其他欧洲包括前苏联成员国家占有20.7%，其余的产量来自亚洲(17.5%)、加拿大(11%)、拉丁美洲(9.8%)、大洋洲(8%)以及非洲(5%)。

1996年美国的总供应量为943.4万t。自1986年以来，总供应量以平均每年3.6%上升。1996年粗铝生产占总供应量的37.9%，进口占27.3%，回收再生占34.8%。

薄板、厚板和箔料构成美国铝的总产品交货量中的主要份额，剩余的为用于铸造、出口和其他用途的铝锭。以下所列的是主要铝制品的分布比例：

产品形式	分布比例(%)
薄板、厚板、箔料	51.3
铝锭	26.4
挤制品和管材	14.9
其他①	7.4

① 包括导线(3.0%)，盘条、棒材和线材(2.7%)，锻件和冲压件(1.1%)和粉末(0.6%)。

引自：铝业联合协会。

按照目前市场大小递减的顺序，主要的应用领域为：运输(27.6%)、容器和包装(22.8%)、制造和建设(13.7%)、出口(13.5%)、电器(7.0%)、消费耐用品(6.6%)、机器和装备(5.9%)及其他(2.9%)。

铝合金

铝合金的力学性能、物理和化学性质取决于成分和显微组织。在纯铝中，加入选定的元素能大大影响其性能和使用性能。为此，大部分铝的应用都使用含有一种或多种元素的合金。所使用的主要合金添加元素为铜、锰、硅、镁和锌。这些元素的总量能达到构成合金成分的10%(所有的百分比均为质量分数,除非另有注明)。也有一些杂质元素存在，但其总量一般低于铝合金的0.15%。

为方便起见，铝合金分为两大类：锻压制品和铸造制品。每一大类的进一步细分根据其性能形成的主要机制。许多合金的热处理效果则取决于它们的相固溶度。这些处理包括固溶热处理、淬火、析出，或时效、硬化。无论铸造还是锻压的，这类合金都认为是可热处理的。还有大量其他锻压制品合金与之不同的是有赖于通过机械压延所进行的加工硬化，为获得所需的性能通常要结合不同的退火规范。这些合金各具所谓的加工硬化类型。有些铸造合金基本上是不可热处理的，只能以铸造状态或在与固溶或析出效应无关的热改性状态下使用。

现已制订铸造和锻压合金的命名方法。在美国，

最为广泛认可的是铝业协会颁布的体系。它们的合金识别体系对锻压合金和铸造合金采用不同的命名，但是为简单起见将合金分为两大类(详见本章第2节)。对于锻压合金利用一个四位数的表示方法，由此形成以下系列的锻压制品组：

- 1*xxx*：受控的非合金化(纯)制品，主要用于电工和化学工业。
- 2*xxx*：以铜为主要合金元素的铝合金，其他元素特别是镁也有规定。2*xxx* 系列合金广泛应用于飞机，其价值在于它们的高强度(屈服强度高达455MPa或66ksi)。
- 3*xxx*：以锰为主要合金元素的铝合金，作为在建筑以及不同产品的一般用途上的合金使用。
- 4*xxx*：以硅为主要合金元素的铝合金，用于焊条和钎焊薄板。
- 5*xxx*：以镁为主要合金元素的铝合金，用于船体、舷梯和其他处于海洋环境的产品。
- 6*xxx*：以镁和硅为主要合金元素的铝合金，常用于建筑挤压制品。
- 7*xxx*：以锌(虽然其他元素如铜、镁、铬和锆也都有规定)为主要合金元素的铝合金，用于飞机结构件以及其他高强度的用途。7*xxx* 系列是最强的铝合金，屈服强度有可能≥500 MPa(≥73ksi)。
- 8*xxx*：以其余各种合金元素为特征的铝合金，8xxx 系列合金可以含有一定量的锡、锂和/或铁。
- 9*xxx*：保留用于将来的铝合金。

构成可热处理(可析出硬化)铝合金的锻压合金包括 2*xxx*、6*xxx*、7*xxx* 及一些 8*xxx* 合金。用于锻压铝合金的合金添加、强化机制的不同组合如表 3.1-1 所示。不同等级的锻压铝合金能获得的强度范围如表 3.1-2 所示。与铝合金相关的强化机制详细资料可参阅本章第4节。

表 3.1-1 锻压铝合金按照强化机制的分类

合金体系	铝系列
可加工硬化合金	
纯铝	1*xxx*
Al-Mn	3*xxx*
Al-Si	4*xxx*
Al-Mg	5*xxx*
Al-Fe	8*xxx*
Al-Fe-Ni	8*xxx*
析出硬化合金	
Al-Cu	2*xxx*
Al-Cu-Mg	2*xxx*
Al-Cu-Li	2*xxx*
Al-Mg-Si	6*xxx*
Al-Zn	7*xxx*
Al-Zn-Mg	7*xxx*
Al-Zn-Mg-Cu	7*xxx*
Al-Li-Cu-Mg	8*xxx*

表 3.1-2 不同锻压铝合金的强度范围

铝业协会系列	合金成分种类	强化方法	抗拉强度范围	
			MPa	ksi
1*xxx*	Al	冷变形	70~175	10~25
2*xxx*	Al-Cu-Mg(1%~2.5%Cu)	热处理	170~310	25~45
2*xxx*	Al-Cu-Mg-Si(3%~6%Cu)	热处理	380~520	55~75
3*xxx*	Al-Mn-Mg	冷变形	140~280	20~40
4*xxx*	Al-Si	冷变形(有时用热处理)	105~350	15~50
5*xxx*	Al-Mg(1%~2.5%Mg)	冷变形	140~280	20~40
5*xxx*	Al-Mg-Mn(3%~6%Mg)	冷变形	280~380	40~55
6*xxx*	Al-Mg-Si	热处理	150~380	22~55
7*xxx*	Al-Zn-Mg	热处理	380~520	55~75
7*xxx*	Al-Zn-Mg-Cu	热处理	520~620	75~90
8*xxx*	Al-Li-Cu-Mg	热处理	280~560	40~80

铸件成分使用三位数字及小数点后的一位数字表示。在所有的情况里小数.0都表示铸件合金的极限值。小数.1和.2与其铸锭成分有关，在熔化和浇铸后，这种成分应当能形成符合铸件的技术指标要求的化学性质。作为铸件成分的合金家族包括如下：

- 1*xx.x*：受控的非合金化(纯)成分，特别用于制造转子。
- 2*xx.x*：以铜为主要合金元素的铝合金，其他合金元素可另行规定。
- 3*xx.x*：以硅为主要合金元素的铝合金，其他合金元素如铜和镁可另行规定。3*xx.x*系列将近占生产的全部成形铸件的90%。
- 4*xx.x*：以硅为主要合金元素的铝合金。
- 5*xx.x*：以镁为主要合金元素的铝合金。
- 6*xx.x*：未用。
- 7*xx.x*：以锌为主要合金元素的铝合金。其他合金元素如铜和镁可另行规定。
- 8*xx.x*：以锡为主要合金元素的铝合金。
- 9*xx.x*：未用。

可热处理铸造合金包括2*xx*、3*xx*和7*xx*系列。

产品的加工形式

工业用锻压铝制品。根据生产方法以及几何形状主要分为五大类。它们为：①平轧制品(薄板、厚板和箔料)；②圆棒、棒材和线材；③管制品；④型材；⑤锻件。铝工业也像钢铁工业一样，将圆棒、棒材、线材、管制品和型材都称为“轧”制品，尽管它们往往并不是轧制而是挤压而成的。铝锻件通常并不归类于轧制品，而归类于所谓的“工程产品”。工程产品就是为某一特定用途设计的产品，与之相对应的是如标准尺寸的薄板、厚板、圆棒、棒材、线材、管材、管制品和标准型材的“现成产品”。这些标准产品都能从各销售商处购得。工程锻压铝产品还包括特殊挤制型材、模锻件、手工锻件、冲压件和特殊尺寸的标准产品。有关铝轧制品和工程锻压铝产品的更详细的内容可以参阅本章第5节。

工程铝合金铸件。为特定用途设计的，利用压铸模、金属模、湿砂和干砂、熔模铸造和石膏铸造生产的形状和尺寸迥异的铸件。其不同工艺包括真空、低压、离心以及与模型有关的铸造工艺，如失泡模(前面所述的各种造型方法均可参阅本手册“铸造”一章)。表3.1-3列举了1996年铝铸件的销售量统计。交通运输是一个主导性市场，铸件在汽车上应用不断增加的趋势，使其在整个工业规模中的重要性也随之增加。

表3.1-3　1996年各类铝铸件的销售量

铸件类型	销售量①/10^6kg (10^6lb)	占总量比例 (%)
压铸模铸件	1076.1(2372.3)	57.7
金属模和半金属模铸件	548.4(1209.1)	29.4
砂型铸件	153.9(339.4)	8.2
其他	87.9(193.9)	4.7
合计	1866.4(4114.6)②	100

①被圆整的数值可不计入所示的总数里。　②合计量是在所有销售量圆整前合计的圆整值。——译者注。

引自：铝业联合协会。

压铸模铸件一般不用热处理。而其他方法生产的铸件是否进行热处理由它们的用途决定，而且铸造工艺和是否热处理将影响合金的选择。其最常用的合金与用于生产锻压铝合金产品的不同之处主要在于其较高的硅含量。

选用铸件而不是其他的产品形式主要基于对其净形状的考虑。一个有加强肋、内部通道和复杂设计结构的零件，若采用锻压铝产品会因后续的切削加工而造成高昂的成本，故常可以通过设计合适的模型(铸型或金属型)而完成其铸造。作为优质的工程铸件，它们极具整体性和精确的尺寸公差，还能在合金及其状态均已经选定的情况下，将其力学性能稳定地控制在应有的高强度特性的上限范围里。有关铝铸件的更详细的内容将在本章第7节里阐述。

粉末冶金(P/M)零件。它可以借助不同的工艺成形。对于一些要求不高的用途，将金属粉末在模型里压制成压实块，然后使其在高温和保护性的气氛里进行烧结(扩散粘结)。在此烧结过程中，压实块得到固结和强化。烧结压实块的密度可通过P/M压实块的二次压制而得到增加。二次压制后可以进行再烧结，以此消除因冷压而引起的应力，并使其组织进一步固结。仅经过一次压制和烧结，零件产生的密度可超过理论密度的80%。经过二次压制以及经或不经二次烧结，零件可达到理论密度的90%或更高。

对于要求较高的用途，如需增强耐应力腐蚀开裂的航天用零部件，可采用更加先进的技术使经快速凝固或使用机械磨细的铝粉进行固结，其最后密度接近100%。这种固结方法包括热等静压压制、锻压、辊轧、挤制、超高应变率(动态的)压实和喷涂沉积技术。无法用传统的锭模方法生产的合金可以

采用先进的P/M工艺方法进行常规制造。更详细的有关铝P/M工艺的内容可参阅本章第9节。

金属基体复合材料(MMC)。主要是在金属基体里掺混入非金属增强剂而构成的。它将重量轻、耐腐蚀及一些有用的力学性能都组合在一起，使铝合金得以普及，也使铝MMC更为有用。铝的熔点对于满足许多用途的要求来说还是足够高的，然而对于使复合工艺变得更为简便来说却是较低的。铝能适应不同的增强剂。以连续或不连续纤维为特征的增强剂一般在复合材料里构成其体积的20%或更多。增强铝MMC家族包括连续硼纤维、氧化铝纤维、碳化硅纤维和石墨纤维，以及各种颗粒、短纤维和须状材料增强铝。MMC的工艺和性质将在本篇第14章中阐述。

制造特性

这一节概要地介绍在铝合金的切削、成形、锻压和连接中的一些重要问题。其余的有关内容包含在本手册中涉及特种制造工艺的部分里。表3.1-4汇总了普通使用的锻压牌号或合金的制造特性。

表3.1-4 锻压铝合金的制造特性比较

合金	状态	冷变形加工性①	切削性①	焊接性②			硬钎焊②	软钎焊③
				气焊	弧焊	电阻焊和缝焊		
1050	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12	A	E	A	A	A	A	A
	H14	A	D	A	A	A	A	A
	H16	B	D	A	A	A	A	A
	H18	B	D	A	A	A	A	A
1060	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12	A	E	A	A	A	A	A
	H14	A	D	A	A	A	A	A
	H16	B	D	A	A	A	A	A
	H18	B	D	A	A	A	A	A
1100	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12	A	E	A	A	A	A	A
	H14	A	D	A	A	A	A	A
	H16	B	D	A	A	A	A	A
	H18	C	D	A	A	A	A	A
1145	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12	A	E	A	A	A	A	A
	H14	A	D	A	A	A	A	A
	H16	B	D	A	A	A	A	A
	H18	B	D	A	A	A	A	A
1199	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12	A	E	A	A	A	A	A
	H14	A	D	A	A	A	A	A
	H16	B	D	A	A	A	A	A
	H18	B	D	A	A	A	A	A

（续）

合金	状　态	冷变形加工性[1]	切削性[1]	焊接性[2] 气焊	焊接性[2] 弧焊	焊接性[2] 电阻焊和缝焊	硬钎焊[2]	软钎焊[3]
1350	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12，H111	A	E	A	A	A	A	A
	H14，H24	A	D	A	A	A	A	A
	H16，H26	B	D	A	A	A	A	A
	H18	B	D	A	A	A	A	A
2011	T3	C	A	D	D	D	D	C
	T4，T451	B	A	D	D	D	D	C
	T8	D	A	D	D	D	D	C
2014	O	—	D	D	D	B	D	C
	T3，T4，T451	C	B	D	B	B	D	C
	T6，T651，T6510，T6511	D	B	D	B	B	D	C
2024	O	—	D	D	D	D	D	C
	T4，T3，T351，T3510，T3511	C	B	C	B	B	D	C
	T361	D	B	D	C	B	D	C
	T6	C	B	D	C	B	D	C
	T861，T81，T851，T8510，T8511	D	B	D	C	B	D	C
	T72	—	B	—	—	—	—	—
2036	T4	B	C	—	B	B	D	—
2124	T851	D	B	D	C	B	D	C
2218	T61	—	—	—	—	C	—	C
	T72	—	B	D	C	B	D	C
2219	O	—	—	D	A	B	D	—
	T31，T351，T3510，T3511	C	B	A	A	A	D	NA
	T37	D	B	A	A	A	D	—
	T81，T851，T8510，T8511	D	B	A	A	A	D	—
	T87	D	B	A	A	A	D	—
2618	T61	—	B	D	C	B	D	NA
3003	O	A	E	A	A	B	A	A
	H12	A	E	A	A	A	A	A
	H14	B	D	A	A	A	A	A
	H16	C	D	A	A	A	A	A
	H18	C	D	A	A	A	A	A
	H25	B	D	A	A	A	A	A

（续）

合金	状　　态	冷变形加工性①	切削性①	焊接性②			硬钎焊②	软钎焊③
				气焊	弧焊	电阻焊和缝焊		
3004	O	A	D	B	A	B	B	B
	H32	B	D	B	A	A	B	B
	H34	B	C	B	A	A	B	B
	H36	C	C	B	A	A	B	B
	H38	C	C	B	A	A	B	B
3105	O	A	E	B	A	B	B	B
	H12	B	E	B	A	B	B	B
	H14	B	D	B	A	A	B	B
	H16	C	D	B	A	A	B	B
	H18	C	D	B	A	A	B	B
	H25	B	D	B	A	A	B	B
4032	T6	—	B	D	B	C	D	NA
4043		NA	C	NA	NA	NA	NA	NA
5005	O	A	E	A	A	B	B	B
	H12	A	E	A	A	A	B	B
	H14	B	D	A	A	A	B	B
	H16	C	D	A	A	A	B	B
	H18	C	D	A	A	A	B	B
	H32	B	E	A	A	A	B	B
	H34	C	D	A	A	A	B	B
	H36	C	D	A	A	A	B	B
	H38	—	D	A	A	A	B	B
5050	O	A	E	A	A	B	B	C
	H32	A	D	A	A	A	B	C
	H34	B	D	A	A	A	B	C
	H36	C	C	A	A	A	B	C
	H38	C	C	A	A	A	B	C
5052	O	A	D	A	A	B	C	D
	H32	B	D	A	A	A	C	D
	H34	B	C	A	A	A	C	D
	H36	C	C	A	A	A	C	D
	H38	C	C	A	A	A	C	D
5056	O	A	D	C	A	B	D	D
	H111	A	D	C	A	A	D	D
	H12，H32	B	D	C	A	A	D	D

（续）

合金	状态	冷变形加工性①	切削性①	焊接性②			硬钎焊②	软钎焊③
				气焊	弧焊	电阻焊和缝焊		
5056	H14，H34	B	C	C	A	A	D	D
	H18，H38	C	C	C	A	A	D	D
	H192	D	B	C	A	A	D	D
	H392	D	B	C	A	A	D	D
5083	O	B	D	C	A	B	D	D
	H321，H116	C	D	C	A	A	D	D
	H111	C	D	C	A	A	D	D
5086	O	A	D	C	A	B	D	D
	H32，H116	B	D	C	A	A	D	D
	H34	B	C	C	A	A	D	D
	H36	C	C	C	A	A	D	D
	H38	C	C	C	A	A	D	D
	H111	B	D	C	A	A	D	D
5154	O	A	D	C	A	B	D	D
	H32	B	D	C	A	A	D	D
	H34	B	C	C	A	A	D	D
	H36	C	C	C	A	A	D	D
	H38	C	C	C	A	A	D	D
5182	O	A	D	C	A	B	D	D
	H19	D	B	C	A	A	D	D
5252	H24	B	D	A	A	A	C	D
	H25	B	C	A	A	A	C	D
	H28	C	C	A	A	A	C	D
5254	O	A	D	C	A	B	D	D
	H32	B	D	C	A	A	D	D
	H34	B	C	C	A	A	D	D
	H36	C	C	C	A	A	D	D
	H38	C	C	C	A	A	D	D
5356		NA	B	NA	NA	NA	NA	NA
5454	O	A	D	C	A	B	D	—
	H32	B	D	C	A	A	D	—
	H34	B	C	C	A	A	D	NA
	H111	B	D	C	A	A	D	—
5456	O	B	D	C	A	B	D	—
	H111	C	D	C	A	A	D	—
	H321，H115	C	D	C	A	A	D	NA
5457	O	A	E	A	A	B	B	B

（续）

合金	状　态	冷变形加工性①	切削性①	焊接性②			硬钎焊②	软钎焊③
				气焊	弧焊	电阻焊和缝焊		
5652	O	A	D	A	A	B	C	D
	H32	B	D	A	A	A	C	D
	H34	B	C	A	A	A	C	D
	H36	C	C	A	A	A	C	D
	H38	C	C	A	A	A	C	D
5657	H241	A	D	A	A	A	B	—
	H25	B	D	A	A	A	B	NA
	H26	B	D	A	A	A	B	—
	H28	C	D	A	A	A	B	—
6005	T5	C	C	A	A	A	A	NA
6009	T4	A	C	A	A	A	A	B
6010	T4	B	C	A	A	A	A	B
6061	O	A	D	A	A	B	A	B
	T4，T451，T4510，T4511	B	C	A	A	A	A	B
	T6，T651，T652，T6510，T6511	C	C	A	A	A	A	B
6063	T1	B	D	A	A	A	A	B
	T4	B	D	A	A	A	A	B
	T5，T52	B	C	A	A	A	A	B
	T6	C	C	A	A	A	A	B
	T83，T831，T832	C	C	A	A	A	A	B
6066	O	B	D	D	B	B	D	—
	T4，T4510，T4511	C	C	D	B	B	D	NA
	T6，T6510，T6511	C	B	D	B	B	D	—
6070	T4，T4511	B	C	A	A	A	B	NA
	T6	C	C	A	A	A	B	—
6101	T6，T63	C	C	A	A	A	A	NA
	T61，T64	B	D	A	A	A	A	—
6151	T6，T652	—	—	—	—	—	—	B
6201	T81	—	C	A	A	A	A	NA
6262	T6，T651，T6510，T6511	C	B	A	A	A	A	NA
	T9	D	B	A	A	A	A	—
6351	T5，T6	C	C	A	A	A	A	B
6463	T1	B	D	A	A	A	A	—
	T5	B	C	A	A	A	A	NA
	T6	C	C	A	A	A	A	—

（续）

合金	状　态	冷变形加工性①	切削性①	焊接性②			硬钎焊②	软钎焊③
				气焊	弧焊	电阻焊和缝焊		
7005	T53	C	A	B	B	B	B	B
7049	T73，T7351，T7352	D	B	D	C	B	D	D
	T76，T7651	D	B	D	C	B	D	D
7050	T74，T7451，T7452	D	B	D	C	B	D	D
	T76，T761	D	B	D	C	B	D	D
7072	—	A	D	A	A	A	A	A
7075	O	—	D	D	C	B	D	D
	T6，T651，T652，T6510，T6511	D	B	D	C	B	D	D
	T73，T7351	D	B	D	C	B	D	D
7175	T74，T7452	D	B	D	C	B	D	D
7178	O	—	—	D	C	B	D	D
	T6，T651，T6510，T6511	D	B	D	C	B	D	D
7475	T6，T651	D	B	D	C	B	D	D
	T73，T7351，T7352	D	B	D	C	B	D	D
	T76，T7651	D	B	D	C	B	D	D

①用A～D评价冷变形加工性，并用A～E评价切削性，其相对评价性是以递减为顺序的。 ②用A～D评价焊接性和硬钎焊性，其相对评价性定义如下：A＝用所有工业用规程及方法均具有一般的焊接性。B＝用特殊技术或用于特定用途所具有的焊接性，要求通过初步的试制或试验制定焊接规程和焊接性能。C＝由于对裂纹的敏感性和丧失耐腐蚀性和力学性能，只有有限的焊接性。D＝不能形成普通可应用的焊接方法。 ③用A～D以及NA评价软钎焊，其相对评价性定义为：A＝优、B＝好、C＝尚可、D＝差、NA＝不可用。

切削性。切削容易及高加工速度，是铝能够制造低成本成品零件最为重要的因素之一。铝能以大部分切削加工设备所能够达到的最高速度进行车削、铣削、镗削或其他方式的切削加工。其灵活的切削特征的另一个优点就是铝杆和铝棒可以借助自动螺纹机床容易地进行高速加工。

对于不同的锻压和铸造铝合金及其生产形成的不同状态，它们的切削特征有着相当大的差异（表3.1-4），为此要求用特殊的刀具（例如多晶体金刚石刀具）或技术切削加工硬度＞100HB的高硅含量的铸造铝合金。硬度和屈服强度可近似作为其切削性的表征。

化学蚀铣。在碱性或酸性溶液中，通过化学侵蚀除去金属是一种特殊的减薄厚度的工艺方法。若要求对大型的复杂表面进行均匀的金属材料去除，化学蚀铣常是最经济的方法。这种工艺广泛地应用于蚀铣经过预成形的航天用零件，以此获得最大强度-重量比。整体型的刚性铝翼和机身，就是通过化学蚀铣生产出最佳横截面和最小表皮厚度的。此外化学蚀铣还常用于桁梁、纵梁、横梁和框架的制造。

成形性。这是铝及其众多合金较为重要的特性之一。抗拉强度和屈服强度的比率、塑性以及加工硬化的速率制约着不同的允许变形量。

比较工业用铝合金在不同状态下的成形性的相对评价取决于成形工艺。这种评价一般能为金属的加工特性提供可靠的比较，但也只能作为大概的指标，而不能将其作为定量的成形极限值使用。

状态的选择取决于成形作业的剧烈程度和性质。像拉深、轧制和小半径弯曲的一些剧烈成形工艺，会要求退火状态。通常，要在能够均匀一致地成形的前提下选择最强的状态。对于不太剧烈的成形工序，采用中等状态或甚至用完全硬化的状态都是可以的。

可热处理合金的成形能够满足高强度-重量比的应用要求。这些合金的退火状态是最可变形加工的状态，但是为提高性能而进行的后续热处理会造成尺寸变化和形状扭曲，因此要求进行校直和其他尺寸控制工序都是很重要的考虑因素。固溶热处理和淬火

(T3、T4或W状态)后立即进行成形的合金，其成形性与经退火的相接近，然后继之以自然或人工的时效。W状态的零件能够长时间地储存在低温(约为-30～-35℃或-20～-30℉,或更低)里，以此作为防止自然时效和维持所需成形性的一种方法。经固溶热处理和淬火而非人工时效(T3、T4或W状态)的材料，如果不能在淬火后立即进行这些工序，一般则仅适合于较为缓和的成形工序，如弯曲、适度拉拔或中等的压延成形。固溶热处理和人工时效(T6状态)合金一般并不适用于成形工序。

可锻性。铝合金可以锻造成形状和种类范围都很大的各种锻件，而且有很大一部分的成品零件的锻造设计规范是根据所需用途而定的。铝合金锻件尤其是闭合模锻件，通常能生产出比热锻碳素钢和/或合金钢形状更为精密的成品锻件。对于形状一定的铝合金锻件，锻造所要求的压力可在很大的范围里变化，主要取决于被锻合金的化学成分、采用的锻造工艺、锻造的应变速率、锻件的类型、润滑条件以及锻件和模具的温度。

一般认为，铝合金作为一类合金比碳素钢和许多的合金钢更难以进行锻造。然而，与镍/钴-基合金和钛合金相比，铝合金还是可锻的，特别是用传统的锻造工艺技术，这时需将模具加热到540℃(1000℉)或低一些。

连接。铝可以用许多不同的方法进行连接，包括熔焊和电阻焊、硬钎焊、软钎焊、胶粘连接，以及机械连接如铆接和螺纹连接。影响铝焊接的因素有：

- 氧化铝表层；
- 热导率；
- 线膨胀系数；
- 熔化特性；
- 电导率。

氧化铝是铝表面暴露在空气中后立即形成的。用熔化的方法将铝进行焊接之前，必须用切削、锉削、钢丝刷刷除、刮削或化学清洗的方法将氧化层去除。如果氧化物没有去除，则氧化物的屑片就会包裹在焊缝里，并将造成塑性的下降、熔化不足及有可能焊接开裂。在焊接过程中，必须利用非氧化气体(如氩气、氦气或氢气)，或采用助熔剂将连接部保护起来，以防止氧化物的再次生成。

热导率是一种最能影响焊接性的性质。铝的热导率大约是铜的一半和低碳钢的4倍。这就意味着为提升同样高的局部温度，给铝合金提供热量的速度应当是钢的4倍。然而铝的高热导率有助于铝的焊缝熔池的凝固，从而使焊接位置变形的情况有所好转。

线膨胀系数是一种材料随其温度的变化而在长度方向上引起的尺度变化，它是在考虑焊接性时的另一个重要物理性质。铝的线膨胀系数是钢的2倍。这就意味着焊接铝的时候，要特别注意使接头间距保持均匀。于是在进行主要的焊接操作之前，有必要通过临时性的点焊把要连接的零件组装在一起。

若达不到合理的高速焊接，那么由于高线膨胀系数和高热导率的结合会在铝焊接的过程中造成很大的扭曲变形。

作为铝合金的熔化特性，其熔化温度范围比铜或钢要低得多。熔化温度与体积热容以及铝合金的熔化热，决定了铝合金进入焊接温度范围所要求的热量也少得多。

电导率对熔化焊接的影响极小，但是对要进行电阻焊的材料来说是一个非常重要的性质。在电阻焊里，热量是在焊接电流流经金属电阻时产生的，这些热量使有电流流经的金属部分接近或达到其熔点。铝的电导率比钢高，这说明为了产生同样的加热效果，它需要更大的电流。所以对于焊接彼此相当的截面而言，用于铝的电阻焊机必须比通常用于钢的有更高的输出能力。表3.1-4中列出了所选的锻压铝合金的焊接、硬钎焊和软钎焊的特性。

抛光

在许多的产品设计中甚至不用安排进一步的抛光，铝的天然金属表面已足够美观。其天然氧化物保护膜是透明的并且能通过阳极化增厚，于是保护性得到增加，却不会影响其金属的外观。

但是铝也还是可以进行许多不同的抛光，以根据需要改变外观或增强表面特性。表面可以从粗糙、亚光直到做成镜面。借助于适当的化学或阳极化工艺可以给金属表面增添色彩，还能使用表面涂层，如油漆、喷漆、搪瓷、电镀或薄板压层。

应用

对于许多应用，铝合金是属于经济型的。它应用于汽车工业、航空航天工业、机器制造、家用电器、结构件、厨房用具、电气设备外壳、冷冻用途的压力容器和其他方面。表3.1-5和表3.1-6分别列出了一些较为常用的锻压和铸造合金的典型用途。

表3.1-5　锻压铝合金的用途选例

合金	用途选例及其描述
1100	高耐化学侵蚀和气候侵蚀的工业用纯铝。低成本，具有适宜于深拉的塑性，易于焊接。用于高纯度铝的用途，如化学处理设备，还能用于铭牌、风扇叶片、管道内衬、金属薄板制品、离心中空制品和散热片
1350	导电体
2011	螺纹制品、器具零件和装饰件、武器、汽车、电子器件、紧固件、硬件和机器零件
2014	卡车车架、飞机构件、汽车零件、缸体和活塞、机器零件、结构件
2017	螺纹制品、配件、紧固件、机器零件
2024	高强度的结构用途。T-状态下具有极佳切削性。具有较好的变形加工性和耐腐蚀性。纯铝覆面的硬铝合金(Alclad)2024，将2024的高强度与工业用纯铝的耐腐蚀性相结合。用于卡车车轮、飞机上的结构件、机器用齿轮、螺纹制品、汽车零件、缸体和活塞、紧固件、武器、娱乐设备、螺钉和铆钉
2219	用于高温(至315℃或600℉)的结构件。高强度焊接件
3003	最普通用途的合金。强度超过1100，但成形性和焊接性与之相同。作为一般应用，包括金属薄板制品、冲压件、燃料槽罐、化学设备、容器、箱柜、冰箱内胆、厨房用具、压力容器、建筑构件、储罐、农业用途、器具零件和装饰件、建筑用途、电子器件、散热片、风扇设备、铭牌、游览车、卡车和拖车。用于拉制和旋压
3004	金属薄板制品、储罐、农业用途、建筑制品、容器、电子器件、游览车、卡车和拖车
3105	居住区隔板、活动板房、挡雨板、金属薄板制品、器具零件和装饰件、汽车零件、建筑制品、电子器件、散热厚箔、家具、医院和医疗设备、厨房设备、游览车、卡车和拖车
5005	规定需阳极化的用途；阳极化镀层比3003更清洁，颜色更浅。用途包括器具、用具、建筑构件、要求有良好导电性的用途、汽车零件、容器、一般的金属薄板、硬件、医院和医疗设备、厨房设备、铭牌、船舶用途
5052	强度比3003高，并在中等状态下还易于成形。良好的焊接性和耐腐蚀性。应用包括压力容器、风扇叶片、槽罐、电子仪器面板、电子仪器的底板、中等强度的金属薄板零件、液压管、器件、农业用途、建筑用途、汽车零件、建筑制品、化学设备、容器、烹饪用具、紧固件、硬件、高速公路标识牌、医院和医疗设备、厨房设备、船舶用途、铁路机车、游览车、卡车和拖车
5056	电缆铠装、铝镁合金铆钉、筛网线、拉链、汽车用途、栅栏线、紧固件
5083	各种的焊接组件、船用器件和用于要求具有高焊接效率和高连接强度的槽罐。用于温度高达65℃(150℉)及许多低温冷冻环境下的压力容器、桥梁、货车、船用器件、电视发射塔、钻机、运输设备、火箭零件和翻斗车车体。良好的耐腐蚀性
5086	一般与5083应用相同，特别是需耐应力腐蚀或大气腐蚀的用途
5454	各种焊接件、槽罐、压力容器。ASME规范允许至205℃(400℉)。也可用于运载热沥青的油槽车和翻斗车的车体，及储存过氧化氢和化学品的容器
5456	各种焊接组件、储存罐、压力容器和船用器件。用于要求具有高焊接效率和高连接强度的场合。温度限于65℃(150℉)以下
5657	用于需阳极化的汽车和器具的装饰和铭牌
6061	在T-状态下良好的成形性、焊接性、耐腐蚀性以及强度。为性能良好的一般用途合金，适用于包括卡车零件、铁路机车、输送管线、船舶用途、家具、农业用途、飞机、建筑用途、汽车零件、建筑制品、化学设备、翻斗车车体、电子和电气用途、紧固件、围栏、风扇叶片、一般的金属薄板、高速公路标识牌、医院和医疗设备、厨房设备、机器零件、武器、娱乐设备、游览车和储罐等，范围广泛的结构用途和焊接组件
6063	用于管状护栏、家具、建筑挤制品、器具零件和装饰件、汽车零件、建筑制品、电气和电子零件、高速公路标识牌、医院和医疗设备、厨房设备、船舶用途、机器零件、管线、铁路机车、娱乐设备、游览车、卡车和拖车

（续）

合金	用途选例及其描述
7050	飞机和其他结构中的高强度合金，还用于武器和娱乐设备
7075	用于要求高强度的飞机及其他用途。纯铝覆面的硬铝合金(Alclad)7075，结合了7075的高强度与纯铝的耐腐蚀性。还可用于其他零件和武器

表3.1-6　铸造铝合金的用途选例

合　金	用途选例及其描述
100.0	直径大于152mm(6in)的电动机转子
201.0	结构件，缸体和活塞，齿轮、泵和航空航天器壳体
208.0	一般用途的铸件，阀体、歧管和其他压力密封件
222.0	垫片、量仪零件、轴承、轴承盖、汽车活塞、缸盖
238.0	电熨斗的底板
242.0	重型活塞、空冷缸盖、飞机发动机壳体
A242.0	柴油机和飞机活塞、空冷缸盖、飞机发动机壳体
B295.0	齿轮箱体、飞机用附件、压缩机连杆、铁路车厢座椅架
308.0	一般用途的金属模铸件、装饰性格栅和反光镜
319.0	发动机曲轴箱、汽油和润滑油油箱、油底壳、打字机机架、发动机零件
332.0	汽车和重型活塞、带轮、滑轮
333.0	气体量计和调节器的零件、多联齿轮、活塞、一般的汽车铸件
354.0	用于航天工业的高强度铸件
355.0	砂型：空气压缩机活塞、印刷机底板、水套、曲轴箱 金属型：涡轮、飞机附件、正时齿轮、喷气发动机机体
356.0	砂型：飞轮铸件、汽车变速箱体、油底壳、泵体、 金属型：机床零件、飞机起落轮、飞行器机体铸件、桥梁栏杆
A356.0	要求高强度的结构零件，机器零件和卡车底盘零件
357.0	耐腐蚀和压力密封用途
359.0	用于航空航天工业的高强度铸件
360.0	艇外推进器零件、仪器外壳、盖板、船和飞机用铸件
A360.0	盖板、仪器外壳、点火系统零件、艇外推进器零件、铰链
380.0	割草机和无线电发射器的机体、空气制动器铸件、齿轮箱体
A380.0	要求强度和耐高温的用途
384.0	活塞和其他严酷条件下的用途、自动变速箱
390.0	内燃机活塞、缸体、歧管和缸盖
413.0	建筑、装饰、船用、食品和乳品设备的用途
A413.0	艇外推进器活塞、牙科设备、打字机机架、路灯灯座
443.0	烹饪用具、管接头、船用附件、轮胎模具、化油器体
514.0	用于化学物质和污水中的附件、乳品和食品处理设备、轮胎模具
A514.0	建筑和装饰用附件的金属模铸件
518.0	建筑和装饰用铸件、输送机零件、飞机和船用铸件
520.0	飞机附件、铁路旅客护栏、卡车和公交车围栏
535.0	仪器零件和其他要求尺寸稳定的用途
A712.0	需要进行硬钎焊的一般用途铸件
713.0	汽车零件、泵、拖车零件、矿山设备
850.0	用于铁路的垫片和滑动轴承
A850.0	轧机轴承和类似用途

精选参考资料

- *Aluminum Statistical Review for 1996*, The Aluminum Association Inc., Issued 1997.
- *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1993.
- *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 3–215.

第2节　铝的合金和状态代号系统

铝及其合金的代号系统是由美国国家标准学会(ANSI)的标准H35.1所规定的，它包括产品形式(锻压、铸造或铸锭)和它的各种状态(除铸锭没有状态分类以外)。铝业协会是负责在美国按ANSI H35.1进行有关铝合金代号、成分和状态注册登记的机构。

锻压铝及其合金的代号系统

使用一种四位数的代号系统辨别锻压铝及其合金。如下所示，四位数中的第一位数表示组：

铝系列，≥99.00%	1*xxx*
铝合金，按照其主要合金元素分组	
铜	2*xxx*
锰	3*xxx*
硅	4*xxx*
镁	5*xxx*
镁和硅	6*xxx*
锌	7*xxx*
其他元素	8*xxx*
待用系列	9*xxx*

对于从2*xxx*到7*xxx*的系列，合金组是由里面所存在的合金元素最高平均质量分数确定。其中6*xxx*是一例外，其重要的是里面镁与硅的比例决定了硅化镁(Mg_2Si)的构成。另一个例外是一种合金可以看成之前已登记的另一种合金的改进型。如果有不止一种元素的最高平均质量分数都相同，则组别的选用就按照以下的组别顺序决定：铜、锰、硅、镁、硅化镁、锌或其他。

铝。在1*xxx*组里，系列10*xx*用于代表非合金化成分并具有天然的杂质含量极限。其代号四位数中的后面两位数字表示铝的最低含量。当将最低含量表示到最接近0.01%时，这两位数就等于其质量分数的小数点右面两位数字。第二位数字不为零(整数从1～9，根据需要依次给出)的代号表示对一种或多种个别杂质的特别控制。

铝合金。从2*xxx*到8*xxx*的铝合金组里代号的第二位数字表示合金的改进型。如果第二位数字为零，则表示它是原始合金，整数1～9依次表示原始合金的改进。判断一个被申请的合金究竟是之前已注册合金的改进型还是新的合金，已有明确的规则可循。从2*xxx*到8*xxx*的四位数字的后面两位并没有特别的含义，仅用于辨别同一组里的不同铝合金。

铸造铝及其合金的代号系统

使用包含有一个小数点的四位数代号系统辨别铸造形态的铝及其合金，以及铸锭。如下所示，四位数中的第一位数表示合金组别：

铝系列，≥99.00%	1*xx.x*
铝合金，按照其主要合金元素分组	
铜	2*xx.x*
硅，并加入铜和/或镁	3*xx.x*
硅	4*xx.x*
镁	5*xx.x*
锌	7*xx.x*
锡	8*xx.x*
其他元素	9*xx.x*
待用系列	6*xx.x*

对于从2*xx.x*到9*xx.x*(除6*xx.x*合金以外)的系列，合金组取决于具有最高平均质量分数的合金元素，除非一种合金其成分作为之前已注册的另一种合金的改进型被进行注册。如果有不止一种元素的最高平均质量分数都相同，那么按照元素周期表中顺序在前的元素决定其组别。

随后的两位数字表示确定的铝合金，或者对于铝系列(1*xx.x*)则表示其纯度。最后一位用小数点与其他数字隔开的数字，表示产品形式，即铸件或铸锭。作为一种原始合金或非合金铝因杂质极限值的改进型，可以用位于代号数字前面的序列字母表示，即以字母序列从A开始(去除I、O、Q和X字母，X留给试验性的合金)。为确定一个所申请的成分是已有合金的改进型还是全新的合金，也有明确的规则以供判断。

铝铸件和铝锭。对于1*xx.x*组，牌号四位数里的第二、三位数字表示铝的最低含量。当将最低铝含量表示到最接近0.01%时，这两位数字等于最低铝含量数值的小数点右面两位数字。最后一位数字表示产品的形式：1*xx*.0为铸件，而1*xx*.1表示铸锭。

铝合金铸件和铸锭。对于从2*xx.x*到9*xx.x*的合

金组，四位数字中的第二、三位数字没有特别的含义，仅用于分辨同一组里的不同合金。最后一位数字即位于小数点右面的数字表示生产的形式：*xxx*.0 表示铸件，而 *xxx*.1 则为铸锭，其含有的合金元素极限值与铸件合金相同，但是表3.1-7中所列的合金元素除外。

表3.1-7 将被重熔成为砂型、金属型或压铸型铸件的铸锭的合金元素和杂质指标

合金元素	化学成分(质量分数,%)			
	铸件			铸锭
	砂型和金属型	压铸型	全部	
铁	≤0.15	—	—	铸件-0.03
	>0.15~0.25	—	—	铸件-0.05
	>0.25~0.6	—	—	铸件-0.10
	>0.6~1.0	—	—	铸件-0.2
	>1.0	—	—	铸件-0.3
	—	≤1.3	—	铸件-0.3
	—	>1.3	—	≤1.1
镁	—	—	<0.50	铸件+0.05①
	—	—	≥0.50	铸件+0.1①
锌	—	>0.25~0.60	—	铸件-0.10
	—	>0.60	—	铸件-0.1

① 仅用于当规定的铸件范围为 $w(\mathrm{Mg})>0.15\%$ 的情况。
引自：ANSI H35.1-1997。

试制合金的代号

试制合金也是按照锻压和铸造合金的代号系统命名，但是要用字头X标明。当其不再是试制合金时，就将其字头去除。在其开发期间和在以试验性代号命名之前，新合金可以用原始开发者所命名的序列数字编号。当以 ANSI H35.1 确定代号后，上述序列数字就不再用了。

铝和铝合金的状态代号系统

美国所使用的铝及其合金的状态代号系统可适用于所有的产品形式(锻压和铸造)，但铸锭除外。该系统是以形成不同状态而采用的机械或热处理或两者兼有的工艺步骤为依据的。状态代号在合金的牌号之后，并用一短划线隔开。基本状态代号由单个大写字母代表。若需要，其主要的细分状态再用跟随在字母后面的一个或多个数字表示。这些数字代表用在产品上形成各种特性组合的特定处理工序。借助附加的数字可以在主要细分范围内分辨处理工况条件上的不同。在热处理过程中，用于使一种合金形成所要求状态的工况条件(诸如时间、温度和淬火速度)与用于使另一种合金形成相同状态的工况条件可以是不一样的。

基本状态代号

F，加工后状态。用于表示用冷变形加工、热变形加工或铸造工艺制造的产品。在其制造过程中，没有对其热态或应变硬化施加过任何专门的控制。对于锻压产品，也不设定任何力学性能指标。

O，退火状态。用于表示经退火处理的锻压产品以期获得最低强度的状态。退火处理可改善铸造产品的塑性和尺寸稳定性。字母O后面可跟随“零”以外的其他数字。

H，应变硬化状态(仅用于锻压产品)。用于表示经应变硬化得到强化的产品，可用补充热处理使其强度降低一些，也可不用。H后面总是跟随两位或更多的数字，在本节的“应变硬化产品的系统”中将会详述。

W，固溶热处理状态。这是一种不稳定的状态，仅适用于合金经过固溶处理后，在室温里其强度的自然(自发)变化一直要经历数月以至数年的时间。只有当表明其自然时效的时间(例如W½h)时，代号才是特定的。参见本节的“可热处理合金的系统”中有关 T*x*51、T*x*52 和 T*x*54 状

态的阐述。

T，固溶热处理状态。适用于经固溶热处理后，数星期里其强度都是稳定的合金。T后面总是跟随一位或更多的数字，在本节的“可热处理合金的系统”中将会详述。

应变硬化产品的系统

利用应变硬化进行强化的锻压产品，其状态代号由H及后面跟随的两个或多个数字所组成。其后的第一个数字表示特定的基本工序。

H1，仅应变硬化。适用的产品经应变硬化而无需补充热处理便可得到所要求的强度。跟随在H1后面的数字表示应变硬化的程度。

H2，应变硬化和部分退火。适用的产品可通过应变硬化使硬化超过成品所要求的程度，然后通过部分退火使强度降低到所要求的程度。对于所有在室温下时效软化的合金，其每一种的H2*x*状态都有着与具有相同第二位数的H3*x*状态的相同大小的最小抗拉强度。对于其他合金，每一种H2*x*状态都有着与具有相同第二位数的H1*x*状态的相同大小的最小抗拉强度，而伸长率稍高一些。跟随在H2后面的数字表示产品经过部分退火后所能保持的应变硬化程度。

H3，应变硬化和稳定化。所适用的产品是经过应变硬化，再通过低温热处理或在其制造过程中因热量的进入使其力学性能稳定化。稳定化通常能改善其塑性。这种代号仅用于那种若不经过稳定化处理，就会在室温里逐渐时效软化的合金。跟随在H3后面的数字表示经过稳定化后所能保持的应变硬化程度。

H4，应变硬化和喷漆或油漆。适用于经过应变硬化后还要在后续油漆或喷漆过程中经历某种受热工序的产品。跟随在这个代号后面的编号表示产品经过油漆/喷漆的养护工序热处理后所能保持的应变硬化程度。相应于H2*x*或H3*x*的力学性能极限值都能适用。

附加的状态代号。跟随在代号H1、H2、H3和H4后面的数字是用抗拉强度最小值表示其应变硬化的程度。编号8定义为正常生产的最硬状态。状态H*x*8的最小抗拉强度值可以从表3.1-8根据合金在退火状态的最小抗拉强度（以ksi为单位）进行确定。然而，在1992年以前不符合表3.1-8的要求所登记的状态也不作更改了，作为这种合金/状态系统的过渡型或改进型的登记，仍将符合1992年以前所规定的登记要求。

表3.1-8 H*x*8状态的最低拉伸要求

退火状态的最小抗拉强度/ksi	成为H*x*8状态其抗拉强度的增加/ksi
≤6	8
7～9	9
10～12	10
13～15	11
16～18	12
19～24	13
25～30	14
31～36	15
37～42	16
≥43	17

引自：ANSI H35.1-1997。

在O（退火）和H*x*8之间的状态是用编号1至7进行确认的，如：

- 编号4定义状态的抗拉强度约处于O状态与H*x*8状态之间的中点；
- 编号2定义状态的抗拉强度约处于O状态与H*x*4状态之间的中点；
- 编号6定义状态的抗拉强度约处于H*x*4状态与H*x*8状态之间的中点；
- 同样的，编号1、3、5和7定义状态的抗拉强度分别约处于上述相应区段的中点；
- 编号9定义状态的最小抗拉强度为超过H*x*8状态的2ksi或更多。

按照上述方式确认的过渡状态的抗拉强度值若不是以0或5结尾，则应当将其圆整到较高一档以0或5结尾的值上。

如果需要分辨一种两位数H状态的变型，那么可以定义第三位数（1～9）。第三位数字用于定义两位数H状态时，其状态的控制程度或力学性能与原状态不同但相近，或者其某些其他特征受到明显的影响的情况。三位数字的H状态的最小抗拉强度至少接近于相应的两位数的H状态，即接近于毗邻的两个两位数的H状态中的一个。在H状态中，力学性能低于H*x*1状态的产品均可指认为是H*x*1的变型。在所有合金中，一些三位数H状态代号已经被用于指定一些锻压产品，如：

- H*x*11表示，产品在经过未能达到O状态的最后退火后，又得到相当程度的应变硬化，但是从其应变硬化的量或均匀程度上却没有达到H*x*1状态。
- H112表示，产品在其高温加工过程中要求有一些应变硬化，为此有一定的力学性能极限值。

● 用于经压型或压花薄板的 H 状态代号如表 3.1-9 所示。

表 3.1-9　表示铝和铝合金压型或压花薄板的 H 状态代号

压型或压花薄板	用于制造花纹薄板的薄板状态
H114	O
H124	H11
H224	H21
H324	H31
H134	H12
H234	H22
H334	H32
H144	H13
H244	H23
H344	H33
H154	H14
H254	H24
H354	H34
H164	H15
H264	H25
H364	H35
H174	H16
H274	H26
H374	H36
H184	H17
H284	H27
H384	H37
H194	H18
H294	H28
H394	H38
H195	H19
H295	H29
H395	H39

引自：ANSI H35.1-1997。

可热处理合金的系统

利用热处理强化的锻压和铸造产品的状态代号 W 和 T，已在本节中“基本状态代号”里介绍过。代号 W 表示一种不稳定的状态，而代号 T 表示一种非 F、O 或 H 的稳定状态。T 后面跟随 1～10 的数字，分别表示特定的基本处理工序。

T1，从高温成形工序冷却，并经自然时效达到一个充分稳定的状态。这个代号用于那些在完成高温成形工序，如铸造或挤制之后不再进行冷变形加工的产品，这些产品的力学性能也能通过室温时效得到稳定化。它也适用于经成形工序冷却以后再经过平整和校直的产品，而且将不必考虑由于这种冷变形加工而对其规定的性能极限值造成的影响。

T2，从高温成形工序冷却、经冷变形加工，并自然时效达到一个充分稳定的状态。这个代号所指的产品经过热变形加工工序，如轧制或挤制而冷却之后再进行冷变形加工，以此提高其强度；这些产品的力学性能也能通过室温时效得到稳定化。它还适用于进行平整和校直的产品，但是需考虑由于这种冷变形加工而对规定的性能极限值造成的影响。

T3，固溶热处理、冷变形加工和自然时效达到充分稳定的状态。T3 适用于经过固溶热处理后再特别通过冷变形加工提高其强度产品，它的力学性能也是通过室温时效而得到稳定化。它还适用于进行平整和校直的产品，但是需考虑由于这种冷变形加工而对规定的性能极限值造成的影响。

T4，固溶热处理并自然时效达到充分稳定的状态。这个代号表示的产品在固溶热处理后并不进行冷变形加工，其力学性能也是通过室温时效而得到稳定化。如果对该产品进行平整或校直，将不必考虑由于这种冷变形加工而对其规定的性能极限值造成的影响。

T5，从高温成形工序冷却并进行人工时效。T5 表示产品在经过如铸造或挤制的高温成形工艺之后不再进行冷变形加工，并且其力学性能将通过析出热处理得到提高。如果该产品在由成形工艺冷却后又进行平整或校直，将不必考虑由于这种冷变形加工而对其规定的性能极限值造成的影响。

T6，固溶热处理并进行人工时效。本组代号所包含的产品在固溶热处理后不再进行冷变形加工，但通过析出热处理可以使其力学性能、尺寸稳定性或两者同时都得到充分的改善。如果对该产品进行平整或校直，将不必考虑由于这种冷变形加工而对其规定的性能极限值造成的影响。

T7，固溶热处理并进行过时效或稳定化处理。T7 表示锻压产品经超过最高强度点的析出热处理来获得某种特殊的特性，如增强其耐应力腐蚀开裂或剥落腐蚀的能力。它还适用于在固溶热处理后再进行人工时效的铸造产品，以此获得尺寸和强度的稳定性。

T8，固溶热处理、冷变形加工并进行人工时效。使用这个代号的产品经固溶热处理之后需特别再进行冷变形加工来提高其强度，并且通过析出热处理可以使其力学性能、尺寸稳定性或两者同时都得到充分的改善。它还需考虑包括平整和校直在内的任何冷变形加工对其规定的性能极限值造成的影响。

T9，固溶热处理、人工时效并进行冷变形加工。拥有这个代号的产品在经过析出热处理之后再特别进

行冷变形加工来提高其强度。

T10，从高温成形工序冷却、冷变形加工并进行人工时效。T10所代表的产品在经过如轧制或挤制的热变形加工工序的冷却之后，再通过特别的冷变形加工来提高其强度，并通过析出热处理使其力学性能得到充分的提高。它还需考虑冷变形加工包括平整和校直对其规定的性能极限值造成的影响。

附加T状态的变形。当需要确认上述十个主要的T状态中的某一个的变型，可以在其代号上添加附加数字，但添加的第一位数字不得为零。可以为下列的锻压产品定义特定的附加数字组，通过拉延、压缩或拉压组合消除这些产品的应力：

产品形式	永久性残留变形(%)
厚板	1.5~3
轧制或冷精轧的圆棒或棒材	1~3
挤制圆棒、棒材、型材和管材	1~3
拉制管材	0.5~3
模锻件或环形锻件以及轧制环	1~5

通过拉延消除应力的状态包括：

T*x*51：特别用于厚板、轧制或冷精轧的圆棒或棒材、模锻件或环形锻件，以及轧制环，它们在经固溶热处理之后或从高温成形工序冷却之后被拉延到所标明的变形量。经过拉延，这些产品并没有获得进一步的校直。

T*x*510：用于挤压圆棒、棒材、型材和管材，以及拉制管材，它们在经固溶热处理之后或从高温成形工序冷却之后被拉延到所标明的变形量。这种状态的产品，通过拉延并没有获得进一步的校直。

T*x*511：用于挤压圆棒、棒材、型材和管材，以及拉制管材，它们在经固溶热处理之后或从高温成形工序冷却之后被拉延到所标明的变形量。这些产品通过按照标准公差的拉延之后，只获得微小的校直。

通过压缩消除应力的状态包括：

T*x*52：用于在经固溶热处理之后或从高温成形工序冷却之后，借助于压缩消除应力，并由此产生1%~5%永久性残留变形的产品。

通过拉延与压缩的组合消除应力的状态包括：

T*x*54：用于模锻件，通过在精锻模里的二次冷精锻来消除其应力。

同样的数字(51、52和54)可以加在代号W的后面表示不稳定的固溶热处理和应力消除状态。

O或F状态的锻压产品经热处理后所认定的状态代号可用于表明其热处理的相应特性。

T42：用于对O或F状态进行固溶热处理时，以此说明热处理和自然时效达到充分稳定状态的特征。

T62：用于对O或F状态进行固溶热处理时，以此说明热处理和人工时效的功效。

T7*x*2：用于以O或F状态进行固溶热处理并人工过时效时，以达到T7*x*状态的力学性能和耐腐蚀的能力极限。

状态代号T42和T62也用于表示用户可以由任何状态进行热处理的锻压产品，只要能通过这种热处理，就能达到与这些状态相适应的力学性能。

退火产品的代号体系

“O”后面带的一位数字，代表具有特殊性质的退火状态的产品。例如，可热处理合金O1表示要求用与固溶热处理几乎相同的时间和温度进行热处理，并继之以空气冷却的一种产品，这个代号适合用户在固溶热处理之前进行切削加工的产品。力学性能极限值对它并不适用。

未经登记的状态代号

用字母P代表H、T和O的状态变型，由生产厂与买家之间为此达成约定。将字母P置于与之最为接近的代号后面。这种类型的代号可应用于以下一些情形里：

- 该状态在得到登记以前，要对其应用进行有效的限制；
- 试验条件与在铝业协会登记时所要求的不同；
- 力学性能极限值的设置依据与在铝业协会登记时的要求不同；
- 将它作为未曾登记在册的，如铝金属基体复合物之类的产品使用(有关申请铝金属基体复合物的名词术语将在本篇第14章里介绍)。

第3节 化学成分和国际代号

在铝业联合协会里注册的合金代号/成分已超过450种。表3.1-10列出了锻压铝和锻压铝合金的代号和成分极限值。表3.1-11列出了铸件和铸锭形式的铝合金的代号和成分极限值。

铝合金代号的对照

统一编号系统(UNS)

UNS编号将目前由学会、贸易协会和金属与合金的各家用户和生产商所掌控的许多编号系统进行相互关联。表3.1-12列出的是铝业协会(AA)编号与统一编号系统(UNS)编号之间的对照。

表 3.1-10 锻压铝及其铝合金的代号和成分极限值

AA编号	化学成分(质量分数,%)														
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素		Al(最低)
													单个	总量	
1035	0.35	0.6	0.10	0.05	0.05	—	—	0.10	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.35
1040	0.30	0.50	0.10	0.05	0.05	—	—	0.10	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.40
1045	0.30	0.45	0.10	0.05	0.05	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.45
1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.50
1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.60
1065	0.25	0.30	0.05	0.03	0.03	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.65
1070	0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	—	—	0.04	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.70
1080	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	—	—	0.03	0.03	0.05	—	0.03	0.02	—	99.80
1085	0.10	0.12	0.03	0.02	0.02	—	—	0.03	0.03	0.05	—	0.02	0.01	—	99.85
1090	0.07	0.07	0.02	0.01	0.01	—	—	0.03	0.03	0.05	—	0.01	0.01	—	99.90
1100	0.95Si + Fe		0.05 ~ 0.20	0.05	—	—	—	0.10	—	—	①	—	0.05	0.15	99.0
1200	1.00Si + Fe		0.05	0.05	—	—	—	0.10	—	—	—	0.05	0.05	0.15	99.0
1230	0.70Si + Fe		0.10	0.05	0.05	—	—	0.10	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.30
1135	0.60Si + Fe		0.05 ~ 0.20	0.04	0.05	—	—	0.10	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.35
1235	0.65Si + Fe		0.05	0.05	0.05	—	—	0.10	—	0.05	—	0.06	0.03	—	99.35
1435	0.15	0.30 ~ 0.50	0.02	0.05	0.05	—	—	0.10	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.35
1145	0.55Si + Fe		0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.45
1345	0.30	0.40	0.10	0.05	0.05	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.45
1350	0.10	0.40	0.05	0.01	—	0.01	—	0.05	0.03	—	0.05B, 0.02V + Ti	—	0.03	0.10	99.50
1170	0.30Si + Fe		0.03	0.03	0.02	0.03	—	0.04	—	0.05	—	0.03	0.03	—	99.70
1175	0.15Si + Fe		0.10	0.02	0.02	—	—	0.04	0.03	0.05	—	0.02	0.02	—	99.75
1180	0.09	0.09	0.01	0.02	0.02	—	—	0.03	0.03	0.05	—	0.02	0.02	—	99.80

（续）

AA编号	化学成分（质量分数，%）													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素 单个	其他非特定元素 总量	Al（最低）
1185	0.15Si + Fe		0.01	0.02	0.02	—	—	0.03	0.03	0.05	—	0.02	0.01	—	99.85
1285	0.08②	0.08②	0.02	0.01	0.01	—	—	0.03	0.03	0.05	—	0.02	0.01	—	99.85
1188	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	—	—	0.03	0.03	0.05	①	0.01	0.01	—	99.88
1199	0.006	0.006	0.006	0.002	0.006	—	—	0.006	0.005	0.005	—	0.002	0.002	—	99.99
2008	0.50~0.8	0.40	0.7~1.1	0.30	0.25~0.50	0.10	—	0.25	—	0.05	—	0.10	0.05	0.15	余量
2009	0.25	0.05	3.2~4.4	—	1.0~1.6	—	—	0.10	—	—	③	—	0.05	0.15	余量
2010	0.50	0.50	0.7~1.3	0.10~0.40	0.40~1.0	0.15	—	0.30	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
2011	0.40	0.7	5.0~6.0	—	—	—	—	0.30	—	—	④	—	0.05	0.15	余量
2111	0.40	0.7	5.0~6.0	—	—	—	—	0.30	—	—	⑤	—	0.05	0.15	余量
2012	0.40	0.7	4.0~5.5	—	—	—	—	0.30	—	—	⑥	—	0.05	0.15	余量
2014	0.50~1.2	0.7	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	—	0.25	—	—	⑦	0.15	0.05	0.15	余量
2214	0.50~1.2	0.30	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	—	0.25	—	—	⑦	0.15	0.05	0.15	余量
2017	0.20~0.8	0.7	3.5~4.5	0.40~1.0	0.40~0.8	0.10	—	0.25	—	—	⑦	0.15	0.05	0.15	余量
2117	0.8	0.7	2.2~3.0	0.20	0.20~0.50	0.10	—	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
2018	0.9	1.0	3.5~4.5	0.20	0.45~0.9	0.10	1.7~2.3	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
2218	0.9	1.0	3.5~4.5	0.20	1.2~1.8	0.10	1.7~2.3	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
2618	0.10~0.25	0.9~1.3	1.9~2.7	—	1.3~1.8	—	0.9~1.2	0.10	—	—	—	0.04~0.10	0.05	0.15	余量
2219	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.02	—	—	0.10	—	0.05~0.15	0.10~0.25Zr	0.02~0.10	0.05	0.15	余量
2319	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.02	—	—	0.10	—	0.05~0.15	0.10~0.25Zr①	0.10~0.20	0.05	0.15	余量
2419	0.15	0.18	5.8~6.8	0.20~0.40	0.02	—	—	0.10	—	0.05~0.15	0.10~0.25Zr	0.02~0.10	0.05	0.15	余量

（续）

AA编号	化学成分（质量分数，%）													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素 单个	其他非特定元素 总量	Al（最低）
2519	0.25[8]	0.30[8]	5.3～6.4	0.10～0.50	0.50～0.40	—	—	0.10	—	0.05～0.15	0.10～0.25Zr	0.02～0.10	0.05	0.15	余量
2024	0.50	0.50	3.8～4.9	0.30～0.9	1.2～1.8	0.10	—	0.25	—	—	[7]	0.15	0.05	0.15	余量
2124	0.20	0.30	3.8～4.9	0.30～0.9	1.2～1.8	0.10	—	0.25	—	—	[7]	0.15	0.05	0.15	余量
2224	0.12	0.15	3.8～4.4	0.30～0.9	1.2～1.8	0.10	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
2324	0.10	0.12	3.8～4.4	0.30～0.9	1.2～1.8	0.10	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
2025	0.50～1.2	1.0	3.9～5.0	0.40～1.2	0.05	0.10	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
2034	0.10	0.12	4.2～4.8	0.8～1.3	1.3～1.9	0.05	—	0.20	—	—	0.08～0.15Zr	0.15	0.05	0.15	余量
2036	0.50	0.50	2.2～3.0	0.10～0.40	0.30～0.6	0.10	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
2037	0.50	0.50	1.4～2.2	0.10～0.40	0.30～0.8	0.10	—	0.25	—	0.05	—	0.15	0.05	0.15	余量
2038	0.50～1.3	0.6	0.8～1.8	0.10～0.40	0.40～1.0	0.20	—	0.50	0.05	0.05	—	0.15	0.05	0.15	余量
2048	0.15	0.20	2.8～3.8	0.20～0.6	1.2～1.8	—	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
X2080	0.10	0.20	3.3～4.1	0.25	1.5～2.2	—	—	0.10	—	—	0.08～0.25Zr[9]	—	0.05	0.15	余量
2090	0.10	0.12	2.4～3.0	0.05	0.25	0.05	—	0.10	—	—	0.08～0.15Zr[10]	0.15	0.05	0.15	余量
2091	0.20	0.30	1.8～2.5	0.10	1.1～1.9	0.10	—	0.25	—	—	0.04～0.16Zr[11]	0.10	0.05	0.15	余量
2094	0.12	0.15	4.4～5.2	0.25	0.025～0.8	—	—	0.25	—	—	0.04～0.18Zr[12]	0.10	0.05	0.15	余量
2095	0.12	0.15	3.9～4.6	0.25	0.25～0.8	—	—	0.25	—	—	0.04～0.18Zr[13]	0.10	0.05	0.15	余量

（续）

AA编号	化学成分(质量分数,%)													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素		Al(最低)
													单个	总量	
2195	0.12	0.15	3.7~4.3	0.25	0.25~0.8	—	—	0.25	—	—	0.08~0.16Zr[14]	0.10	0.05	0.15	余量
X2096	0.12	0.15	2.3~3.0	0.25	0.25~0.8	—	—	0.25	—	—	0.04~0.18Zr[15]	0.10	0.05	0.15	余量
2097	0.12	0.15	2.5~3.1	0.10~0.6	0.35	—	—	0.35	—	—	0.08~0.16Zr[16]	0.15	0.05	0.15	余量
2197	0.10	0.10	2.5~3.1	0.10~0.50	0.25	—	—	0.05	—	—	0.08~0.15Zr[17]	0.12	0.05	0.15	余量
3002	0.08	0.10	0.15	0.05~0.25	0.05~0.20	—	—	0.05	—	0.05	—	0.03	0.03	0.10	余量
3102	0.40	0.7	0.10	0.05~0.40	—	—	—	0.30	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3003	0.6	0.7	0.05~0.20	1.0~1.5	—	—	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
3303	0.6	0.7	0.05~0.20	1.0~1.5	—	—	—	0.30	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
3004	0.30	0.7	0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	—	—	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
3104	0.6	0.8	0.05~0.25	0.8~1.4	0.8~1.3	—	—	0.25	0.05	0.05	—	0.10	0.05	0.15	余量
3204	0.30	0.7	0.10~0.25	0.8~1.5	0.8~1.5	—	—	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
3005	0.6	0.7	0.30	1.0~1.5	0.20~0.6	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3105	0.6	0.7	0.30	0.30~0.8	0.20~0.8	0.20	—	0.40	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3006	0.50	0.7	0.10~0.30	0.50~0.8	0.30~0.6	0.20	—	0.15~0.40	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3007	0.50	0.7	0.05~0.30	0.30~0.8	0.6	0.20	—	0.40	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3107	0.6	0.7	0.05~0.15	0.40~0.9	—	—	—	0.20	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3307	0.6	0.8	0.30	0.50~0.9	0.30	0.20	—	0.40	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3009	1.0~1.8	0.7	0.10	1.2~1.8	0.10	0.05	0.05	0.05	—	—	0.10Zr	0.10	0.05	0.15	余量
3010	0.10	0.20	0.03	0.20~0.9	—	0.05~0.40	—	0.05	—	0.05	—	0.05	0.03	0.10	余量

（续）

AA编号	化学成分（质量分数，%）														Al（最低）
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素 单个	其他非特定元素 总量	
3011	0.40	0.7	0.05~0.20	0.8~1.2	—	0.10~0.40	—	0.10	—	—	0.10~0.30Zr	0.10	0.05	0.15	余量
3015	0.6	0.8	0.30	0.50~0.9	0.20~0.7	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
3016	0.6	0.8	0.30	0.50~0.9	0.50~0.8	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
4004	9.0~10.5	0.8	0.25	0.10	1.0~2.0	—	—	0.20	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
4104	9.0~10.5	0.8	0.25	0.10	1.0~2.0	—	—	0.20	—	—	0.02~0.20Bi	—	0.05	0.15	余量
4008	6.5~7.5	0.09	0.05	0.05	0.30~0.45	—	—	0.05	—	—	①	0.04~0.15	0.05	0.15	余量
4009	4.5~5.5	0.20	1.0~1.5	0.10	0.45~0.6	—	—	0.10	—	—	①	0.20	0.05	0.15	余量
4010	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.30~0.45	—	—	0.10	—	—	①	0.20	0.05	0.15	余量
4011	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.45~0.7	—	—	0.10	—	—	0.04~0.07Be	0.04~0.20	0.05	0.15	余量
4013	3.5~4.5	0.35	0.05~0.20	0.03	0.05~0.20	—	—	0.05	—	—	⑱	0.02	0.05	0.15	余量
4032	11.0~13.5	1.0	0.50~1.3	—	0.8~1.3	0.10	0.50~1.3	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
4043	4.5~6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	—	0.10	—	—	①	0.20	0.05	0.15	余量
4343	6.8~8.2	0.8	0.25	0.10	—	—	—	0.20	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
4543	5.0~7.0	0.50	0.10	0.05	0.10~0.40	0.05	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
4643	3.6~4.6	0.8	0.10	0.05	0.10~0.30	—	—	0.10	—	—	①	0.15	0.05	0.15	余量
4044	7.8~9.2	0.8	0.25	0.10	—	—	—	0.20	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
4045	9.0~11.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	—	0.10	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
4145	9.3~10.7	0.8	3.3~4.7	0.15	0.15	0.15	—	0.20	—	—	①	—	0.05	0.15	余量
4047	11.0~13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	—	—	0.20	—	—	①	—	0.05	0.15	余量
4147	11.0~13.0	0.8	0.25	0.10	0.10~0.50	—	—	0.20	—	—	①	—	0.05	0.15	余量
4048[19]	9.3~10.7	0.8	3.3~4.7	0.07	0.07	0.07	—	9.3~10.7	—	—	①	—	0.05	0.15	余量

（续）

AA编号	化学成分(质量分数,%)														
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素		Al(最低)
													单个	总量	
5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50~1.1	0.10	—	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5205	0.15	0.7	0.03~0.10	0.10	0.6~1.0	0.10	—	0.05	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5006	0.40	0.8	0.10	0.40~0.8	0.8~1.3	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5010	0.40	0.7	0.25	0.10~0.30	0.20~0.6	0.15	—	0.30	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5016	0.25	0.6	0.20	0.40~0.7	1.4~1.9	0.10	—	0.15	—	—	—	0.05	0.05	0.15	余量
5017	0.40	0.7	0.18~0.28	0.6~0.8	1.9~2.2	—	—	—	—	—	—	0.09	0.05	0.15	余量
5040	0.30	0.7	0.25	0.9~1.4	1.0~1.5	0.10~0.30	—	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5042	0.20	0.35	0.15	0.20~0.50	3.0~4.0	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5043	0.40	0.7	0.05~0.35	0.7~1.2	0.7~1.3	0.05	—	0.25	0.05	0.05	—	0.10	0.05	0.15	余量
5349	0.40	0.7	0.18~0.28	0.6~1.2	1.7~2.6	—	—	—	—	—	—	0.09	0.05	0.15	余量
5050	0.40	0.7	0.20	0.10	1.1~1.8	0.10	—	0.25	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5250	0.08	0.10	0.10	0.05~0.15	1.3~1.8	—		0.05	0.03	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
5051	0.40	0.7	0.25	0.20	1.7~2.2	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5151	0.20	0.35	0.15	0.10	1.5~2.1	0.10	—	0.15	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5351	0.08	0.10	0.10	0.10	1.6~2.2	—	—	0.05	—	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
5451	0.25	0.40	0.10	0.10	1.8~2.4	0.15~0.35	0.05	0.10	—	—	—	0.05	0.05	0.15	余量
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5252	0.08	0.10	0.10	0.10	2.2~2.8	—	—	0.05	—	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
5352	0.45Si+Fe		0.10	0.10	2.2~2.8	0.10	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5552	0.04	0.05	0.10	0.10	2.2~2.8	—	—	0.05	—	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
5652	0.40Si+Fe		0.04	0.01	2.2~2.8	0.15~0.35	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1~3.9	0.15~0.35	—	0.20	—	—	①	0.20	0.05	0.15	余量
5254	0.45Si+Fe		0.05	0.01	3.1~3.9	0.15~0.35	—	0.20	—	—	—	0.05	0.05	0.15	余量

（续）

AA编号	化学成分(质量分数,%)													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素 单个	其他非特定元素 总量	Al(最低)
5454	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	2.4～3.0	0.05～0.20	—	0.25	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
5554	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	2.4～3.0	0.05～0.20	—	0.25	—	—	①	0.05～0.20	0.05	0.15	余量
5654	0.45Si+Fe		0.05	0.01	3.1～3.9	0.15～0.35	—	0.20	—	—	①	0.05～0.15	0.05	0.15	余量
5754	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6～3.6	0.30	—	0.20	—	—	0.10～0.6 Mn+Cr	0.15	0.05	0.15	余量
5954	0.25	0.40	0.10	0.10	3.3～4.1	0.10	—	0.20	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
5056	0.30	0.40	0.10	0.05～0.20	4.5～5.6	0.05～0.20	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5356	0.25	0.40	0.10	0.05～0.20	4.5～5.5	0.05～0.20	—	0.10	—	—	①	0.06～0.20	0.05	0.15	余量
5456	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	4.7～5.5	0.05～0.20	—	0.25	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
5556	0.25	0.40	0.10	0.50～1.0	4.7～5.5	0.05～0.20	—	0.25	—	—	①	0.05～0.20	0.05	0.15	余量
5357	0.12	0.17	0.20	0.15～0.45	0.8～1.2	—	—	0.05	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
5457	0.08	0.10	0.20	0.15～0.45	0.8～1.2	—	—	0.05	—	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
5557	0.10	0.12	0.15	0.10～0.40	0.40～0.8	—	—	—	—	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
5657	0.08	0.10	0.10	0.03	0.6～1.0	—	—	0.05	0.03	0.05	—	—	0.02	0.05	余量
5180	0.35Si+Fe		0.10	0.20～0.7	3.5～4.5	0.10	—	1.7～2.8	—	—	0.08～0.25Zr①	0.06～0.20	0.05	0.15	余量
5082	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0～5.0	0.15	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5182	0.20	0.35	0.15	0.20～0.50	4.0～5.0	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
5083	0.40	0.40	0.10	0.40～1.0	4.0～4.9	0.05～0.25	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
5183	0.40	0.40	0.10	0.50～1.0	4.3～5.2	0.05～0.25	—	0.25	—	—	①	0.15	0.05	0.15	余量
5086	0.40	0.50	0.10	0.20～0.7	3.5～4.5	0.05～0.25	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
5091	0.20	0.30	—	—	3.7～4.2	—	—	—	—	—	⑳	—	0.05	0.15	余量
6101	0.30～0.7	0.50	0.10	0.03	0.35～0.8	0.03	—	0.10	—	—	0.06B	—	0.03	0.10	余量

（续）

AA编号	化学成分（质量分数，%）														
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素		Al（最低）
													单个	总量	
6201	0.50~0.9	0.50	0.10	0.03	0.6~0.9	0.03	—	0.10	—	—	0.06B	—	0.03	0.10	余量
6301	0.50~0.9	0.7	0.10	0.15	0.6~0.9	0.10	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
6003	0.35~1.0	0.6	0.10	0.8	0.8~1.5	0.35	—	0.20	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6004	0.30~0.6	0.10~0.30	0.10	0.20~0.6	0.40~0.7	—	—	0.05	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
6005	0.6~0.9	0.35	0.10	0.10	0.40~0.6	0.10	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6005A	0.50~0.9	0.35	0.30	0.50	0.40~0.7	0.30	—	0.20	—	—	0.12~0.50 Mn+Cr	0.10	0.05	0.15	余量
6105	0.6~1.0	0.35	0.10	0.10	0.45~0.8	0.10	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6205	0.6~0.9	0.7	0.20	0.05~0.15	0.40~0.6	0.05~0.15	—	0.25	—	—	0.05~0.15Zr	0.15	0.05	0.15	余量
6006	0.20~0.6	0.35	0.15~0.30	0.05~0.20	0.45~0.9	0.10	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6206	0.35~0.7	0.35	0.20~0.50	0.13~0.30	0.45~0.8	0.10	—	0.20	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6306	0.20~0.6	0.10	0.05~0.16	0.10~0.0㊀	0.45~0.9	—	—	0.05	—	—	—	0.05	0.05	0.15	余量
6007	0.9~1.4	0.7	0.20	0.05~0.25	0.6~0.9	0.05~0.25	—	0.25	—	—	0.05~0.20Zr	0.15	0.05	0.15	余量
6009	0.6~1.0	0.50	0.15~0.6	0.20~0.8	0.40~0.8	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6010	0.8~1.2	0.50	0.15~0.6	0.20~0.8	0.6~1.0	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6110	0.7~1.5	0.8	0.20~0.7	0.20~0.7	0.50~1.1	0.04~0.25	—	0.30	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
6011	0.6~1.2	1.0	0.40~0.9	0.8	0.6~1.2	0.30	0.20	1.5	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
6111	0.6~1.1	0.40	0.50~0.9	0.10~0.45	0.50~1.0	0.10	—	0.15	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6013	0.6~1.0	0.50	0.6~1.1	0.20~0.8	0.8~1.2	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6113	0.6~1.0	0.30	0.6~1.1	0.10~0.6	0.8~1.2	0.10	—	0.25	—	—	㉑	0.10	0.05	0.15	余量
6017	0.55~0.7	0.15~0.30	0.05~0.20	0.10	0.45~0.6	0.10	—	0.05	—	—	—	0.05	0.05	0.15	余量
6151	0.6~1.2	1.0	0.35	0.20	0.45~0.8	0.15~0.35	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量

㊀ 原文有误。——译者注。

（续）

AA编号	化学成分（质量分数，%）														
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素		Al（最低）
													单个	总量	
6351	0.7～1.3	0.50	0.10	0.40～0.8	0.40～0.8	—	—	0.20	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
6951	0.20～0.50	0.8	0.15～0.40	0.10	0.40～0.8	—	—	0.20	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
6053	㉒	0.35	0.10	—	1.1～1.4	0.15～0.35	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
6253	㉒	0.50	0.10	—	1.0～1.5	0.04～0.35	—	1.6～2.4	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
6060	0.30～0.6	0.10～0.30	0.10	0.10	0.35～0.6	0.05	—	0.15	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6160	0.30～0.6	0.15	0.20	0.05	0.35～0.6	0.05	—	0.05	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
6061	0.40～0.8	0.7	0.15～0.40	0.15	0.8～1.2	0.04～0.35	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
6162	0.40～0.8	0.50	0.20	0.10	0.7～1.1	0.10	—	0.25	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6262	0.40～0.8	0.7	0.15～0.40	0.15	0.8～1.2	0.04～0.14	—	0.25	—	—	㉓	0.15	0.05	0.15	余量
6063	0.20～0.6	0.35	0.10	0.10	0.45～0.9	0.10	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
6463	0.20～0.6	0.15	0.20	0.05	0.45～0.9	—	—	0.05	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
6763	0.20～0.6	0.08	0.04～0.16	0.03	0.45～0.9	—	—	0.03	—	0.05	—	—	0.03	0.10	余量
6066	0.9～1.8	0.50	0.7～1.2	0.6～1.1	0.8～1.4	0.40	—	0.25	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
6070	1.0～1.7	0.50	0.15～0.40	0.40～1.0	0.50～1.2	0.10	—	0.25	—	—	—	0.15	0.05	0.15	余量
6091	0.40～0.8	0.7	0.15～0.40	0.15	0.8～1.2	0.15	—	0.25	—	—	㉑	0.15	0.05	0.15	余量
6092	0.40～0.8	0.30	0.7～1.0	0.15	0.8～1.2	0.15	—	0.25	—	—	㉑	0.15	0.05	0.15	余量
7001	0.35	0.40	1.6～2.6	0.20	2.6～3.4	0.18～0.35	—	6.8～8.0	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
7004	0.25	0.35	0.05	0.20～0.7	1.0～2.0	0.05	—	3.8～4.6	—	—	0.10～0.20Zr	0.05	0.05	0.15	余量
7005	0.35	0.40	0.10	0.20～0.7	1.0～1.8	0.06～0.20	—	4.0～5.0	—	—	0.08～0.20Zr	0.01～0.06	0.05	0.15	余量
7008	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7～1.4	0.12～0.25	—	4.5～5.5	—	—	—	0.05	0.05	0.10	余量
7108	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7～1.4	—	—	4.5～5.5	—	—	0.12～0.25Zr	0.05	0.05	0.15	余量

（续）

AA编号	化学成分(质量分数,%) Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素 单个	总量	Al(最低)
7011	0.15	0.20	0.05	0.10~0.30	1.0~1.6	0.05~0.20	—	4.0~5.5	—	—	—	0.05	0.05	0.15	余量
7013	0.6	0.7	0.10	1.0~1.5	—	—	—	1.5~2.0	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
7016	0.10	0.12	0.45~1.0	0.03	0.8~1.4	—	—	4.0~5.0	—	0.05	—	0.03	0.03	0.10	余量
7116	0.15	0.30	0.50~1.1	0.05	0.8~1.4	—	—	4.2~5.2	0.03	0.05	—	0.05	0.05	0.15	余量
7021	0.25	0.40	0.25	0.10	1.2~1.8	0.05	—	5.0~6.0	—	—	0.08~0.18Zr	0.10	0.05	0.15	余量
7029	0.10	0.12	0.50~0.9	0.03	1.3~2.0	—	—	4.2~5.2	—	0.05	—	0.05	0.03	0.10	余量
7129	0.15	0.30	0.50~0.9	0.10	1.3~2.0	0.10	—	4.2~5.2	0.03	0.05	—	0.05	0.05	0.15	余量
7229	0.06	0.08	0.50~0.9	0.03	1.3~2.0	—	—	4.2~5.2	—	0.05	—	0.05	0.03	0.10	余量
7031	0.30	0.8~1.4	0.10	0.10~0.40	0.10	—	—	0.8~1.8	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
7039	0.30	0.40	0.10	0.10~0.40	2.3~3.3	0.15~0.25	—	3.5~4.5	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
7046	0.20	0.40	0.25	0.30	1.0~1.6	0.20	—	6.6~7.6	—	—	0.10~0.18Zr	0.06	0.05	0.15	余量
7146	0.20	0.40	—	—	1.0~1.6	—	—	6.6~7.6	—	—	0.10~0.18Zr	0.06	0.05	0.15	余量
7049	0.25	0.35	1.2~1.9	0.20	2.0~2.9	0.10~0.22	—	7.2~8.2	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
7149	0.15	0.20	1.2~1.9	0.20	2.0~2.9	0.10~0.22	—	7.2~8.2	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
7249	0.10	0.12	1.3~1.9	0.10	2.0~2.4	0.12~0.18	—	7.5~8.2	—	—	—	0.06	0.05	0.15	余量
7050	0.12	0.15	2.0~2.6	0.10	1.9~2.6	0.04	—	5.7~6.7	—	—	0.08~0.15Zr	0.06	0.05	0.15	余量
7150	0.12	0.15	1.9~2.5	0.10	2.0~2.7	0.04	—	5.9~6.9	—	—	0.08~0.15Zr	0.06	0.05	0.15	余量
7055	0.10	0.15	2.0~2.6	0.05	1.8~2.3	0.04	—	7.6~8.4	—	—	0.08~0.25Zr	0.06	0.05	0.15	余量
7064	0.12	0.15	1.8~2.4	—	1.9~2.9	0.06~0.25	—	6.8~8.0	—	—	0.10~0.50Zr[24]	—	0.05	0.15	余量

（续）

AA编号	化学成分（质量分数，%）													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素 单个	其他非特定元素 总量	Al（最低）
7072	0.7Si+Fe		0.10	0.10	0.10	—	—	0.8~1.3	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
7472	0.25	0.6	0.05	0.05	0.9~1.5	—	—	1.3~1.9	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
7075	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	—	5.1~6.1	—	—	[25]	0.20	0.05	0.15	余量
7175	0.15	0.20	1.2~2.0	0.10	2.1~2.9	0.18~0.28	—	5.1~6.1	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
7475	0.10	0.12	1.2~1.9	0.06	1.9~2.6	0.18~0.25	—	5.2~6.2	—	—	—	0.06	0.05	0.15	余量
7076	0.40	0.6	0.30~1.0	0.30~0.8	1.2~2.0	—	—	7.0~8.0	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
7277	0.50	0.7	0.8~1.7	—	1.7~2.3	0.18~0.35	—	3.7~4.3	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
7178	0.40	0.50	1.6~2.4	0.30	2.4~3.1	0.18~0.28	—	6.3~7.3	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
7090	0.12	0.15	0.6~1.3	—	2.0~3.0	—	—	7.3~8.7	—	—	1.0~1.9Co[26]	—	0.05	0.15	余量
7091	0.12	0.15	1.1~1.8	—	2.0~3.0	—	—	5.8~7.1	—	—	0.20~0.60Co[26]	—	0.05	0.15	余量
7093	0.12	0.15	1.1~1.9	—	2.0~3.0	—	0.04~0.16	8.3~9.7	—	—	0.08~0.20Zr[21]	—	0.05	0.15	余量
8001	0.17	0.45~0.7	0.15	—	—	—	0.9~1.3	0.05	—	—	[27]	—	0.05	0.15	余量
8006	0.40	1.2~2.0	0.30	0.30~1.0	0.10	—	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
8007	0.40	1.2~2.0	0.10	0.30~1.0	0.10	—	—	0.8~1.8	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
8009	1.7~1.9	8.4~8.9	—	0.10	—	0.10	—	0.25	—	1.1~1.5	[28]	0.10	0.05	0.15	余量
8010	0.40	0.35~0.7	0.10~0.30	0.10~0.8	0.10~0.50	0.20	—	0.40	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
8111	0.30~1.1	0.40~1.0	0.10	0.10	0.05	0.05	—	0.10	—	—	—	0.08	0.05	0.15	余量
8112	1.0	1.0	0.40	0.6	0.7	0.20	—	1.0	—	—	—	0.20	0.05	0.15	余量
8014	0.30	1.2~1.6	0.20	0.20~0.6	0.10	—	—	0.10	—	—	—	0.10	0.05	0.15	余量
8015	0.30	0.8~1.4	0.10	0.10~0.40	0.10	—	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
8017	0.10	0.55~0.8	0.10~0.20	—	0.01~0.05	—	—	0.05	—	—	0.04B, 0.003Li	—	0.03	0.10	余量

（续）

AA编号	化学成分(质量分数,%)													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	其他特定元素	Ti	其他非特定元素		Al(最低)
													单个	总量	
X8019	0.20	7.3~9.3	—	0.05	—	—	—	0.05	—	—	㉙	0.05	0.05	0.15	余量
8020	0.10	0.10	0.005	0.005	—	—	—	0.005	—	0.05	㉚	—	0.03	0.10	余量
8022	1.2~1.4	6.2~6.8	—	0.10	—	0.10	—	0.25	—	0.40~0.8	㉛	0.10	0.05	0.15	余量
8030	0.10	0.30~0.8	0.15~0.30	—	0.05	—	—	0.05	—	—	0.001~0.04B	—	0.03	0.10	余量
8130	0.15㉜	0.40~1.0㉜	0.05~0.15	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	0.03	0.10	余量
8040	1.0Si+Fe		0.20	0.05	—	—	—	0.20	—	—	0.10~0.30Zr	—	0.05	0.15	余量
8076	0.10	0.6~0.9	0.04	—	0.08~0.22	—	—	0.05	—	—	0.04B	—	0.03	0.10	余量
8176	0.03~0.15	0.40~1.0	—	—	—	—	—	0.10	0.03	—	—	—	0.05	0.15	余量
8077	0.10	0.10~0.40	0.05	—	0.10~0.30	—	—	0.05	—	—	0.05B㉝	—	0.03	0.10	余量
8177	0.10	0.25~0.45	0.04	—	0.04~0.12	—	—	0.05	—	—	0.04B	—	0.03	0.10	余量
8079	0.05~0.30	0.7~1.3	0.05	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	0.05	0.15	余量
8280	1.0~2.0	0.7	0.7~1.3	0.10	—	—	0.20~0.7	0.05	—	—	5.5~7.0Sn	0.10	0.05	0.15	余量
8081	0.7	0.7	0.7~1.3	0.10	—	—	—	0.05	—	—	18.0~22.0Sn	0.10	0.05	0.15	余量
8090	0.20	0.30	1.0~1.6	0.10	0.6~1.3	0.10	—	0.25	—	—	0.04~0.16Zr㉞	0.10	0.05	0.15	余量

①最高0.0008% Be，仅用于焊条、熔化焊丝。　②最高0.14% Si+Fe。　③最高0.6% O。　④0.20%~0.6% Bi、0.20%~0.6% Pb。　⑤0.20%~0.8% Bi、0.10%~0.50% Sn。　⑥0.20%~0.7% Bi、0.20%~0.6% Sn。　⑦极限值为最高0.20% Zr+Ti的合金代号仅能用于挤制和锻造产品，但是必须为供方和买方双方认可。　⑧最高0.40% Si+Fe。　⑨最高0.005% Be、0.20%~0.50% O。　⑩1.9%~2.6% Li。　⑪1.7%~2.3% Li。　⑫0.25%~0.6% Ag、0.7%~1.4% Li。　⑬0.25%~0.6% Ag、0.7%~1.5% Li。　⑭0.25%~0.6% Ag、0.8%~1.2% Li。　⑮0.25%~0.6% Ag、1.3%~1.9% Li。　⑯1.2%~1.8% Li。　⑰1.3%~1.7% Li。　⑱0.6%~1.5% Bi、最高0.05% Cd。　⑲原为不活泼的4245合金，经再活化成为4048。　⑳1.0%~1.3% C、1.2%~1.4% Li、0.20%~0.7% O。　㉑0.05%~0.50% O。　㉒45%~65%的真实Mg。　㉓0.40%~0.7% Bi、0.40%~0.7% Pb。　㉔0.10%~0.40% Co、0.05%~0.30% O。　㉕极限值为最高0.25% Zr+Ti的合金代号，仅能用于挤制和锻造产品，但是必须为供方和买方双方认可。　㉖0.20%~0.50% O。㉗最高0.001% B、最高0.003% Cd、最高0.001% Co、最高0.008% Li。㉘最高0.30% O。　㉙3.5%~4.5% Ce、0.20%~0.50% O。　㉚0.10%~0.50% Bi、0.10%~0.25% Sn。　㉛0.05%~0.20% O。　㉜最高1.0% Si+Fe。　㉝0.02%~0.08% Zr。　㉞2.2%~2.7% Li。

引自铝业协会。

表 3.1-11 铝的非合金与合金铸件(*xxx*.0)以及铸锭(*xxx*.1 或 *xxx*.2)的代号和成分极限值

代号			化学成分(质量分数,%)									其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品①	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	(最低)
100.1	—	铸锭	0.15	0.6~0.8	0.10	②	—	②	—	0.05	②	—	0.03②	0.10	99.00
130.1	—	铸锭	③	③	0.10	②	—	②	—	0.05	②	—	0.03②	0.10	99.30
150.1	—	铸锭	④	④	0.05	②	—	②	—	0.05	②	—	0.03	0.10	99.50
160.1	—	铸锭	0.10④	0.25④	—	②	—	②	—	0.05	②	—	0.03	0.10	99.60
170.1	—	铸锭	⑤	⑤	—	②	—	②	—	0.05	②	—	0.03②	0.10	99.70
201.0	—	S	0.10	0.15	4.0~5.2	0.20~0.50	0.15~0.55	—	—	—	0.15~0.35	—	0.05⑥	0.10	余量
201.2	—	铸锭	0.10	0.10	4.0~5.2	0.20~0.50	0.20~0.55	—	—	—	0.15~0.35	—	0.05⑥	0.10	余量
A201.0	—	S	0.05	0.10	4.0~5.0	0.20~0.40	0.15~0.35	—	—	—	0.15~0.35	—	0.03⑥	0.10	余量
A201.1	A201.2	铸锭	0.05	0.07	4.0~5.0	0.20~0.40	0.20~0.35	—	—	—	0.15~0.35	—	0.03⑥	0.10	余量
B201.0	—	S	0.05	0.05	4.5~5.0	0.20~0.50	0.25~0.35	—	—	—	0.15~0.35	—	0.05⑦	0.15	余量
203.0	Hiduminium 350	S	0.30	0.50	4.5~5.5	0.20~0.30	0.10	—	1.3~1.7	0.10	0.5~0.25⑧	—	0.05⑨	0.20	余量
203.2	Hiduminium 350	铸锭	0.20	0.35	4.8~5.2	0.20~0.30	0.10	—	1.3~1.7	0.10	0.15~0.25⑧	—	0.05⑨	0.20	余量
204.0	A~U5GT	S, P	0.20	0.35	4.2~5.0	0.10	0.15~0.35	—	0.05	0.10	0.15~0.30	0.05	0.05	0.15	余量
204.2	A~U5GT	铸锭	0.15	0.10~0.20	4.2~4.9	0.05	0.20~0.35	—	0.03	0.05	0.15~0.25	0.05	0.05	0.15	余量
206.0	—	S, P	0.10	0.15	4.2~5.0	0.20~0.50	0.15~0.35	—	0.05	0.10	0.15~0.30	0.05	0.05	0.15	余量
206.2	—	铸锭	0.10	0.10	4.2~5.0	0.20~0.50	0.20~0.35	—	0.03	0.05	0.15~0.25	0.05	0.05	0.15	余量
A206.0	—	S, P	0.05	0.10	4.2~5.0	0.20~0.50	0.15~0.35	—	0.05	0.10	0.15~0.30	0.05	0.05	0.15	余量
A206.2	—	铸锭	0.05	0.07	4.2~5.0	0.20~0.50	0.20~0.35	—	0.03	0.05	0.15~0.25	0.05	0.05	0.15	余量
240.0	A240.0, Al40	S	0.50	0.50	7.0~9.0	0.30~0.7	5.5~6.5	—	0.30~0.7	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
240.1	A240.1, Al40	铸锭	0.50	0.40	7.0~9.0	0.30~0.7	5.6~6.5	—	0.30~0.7	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
242.0	142	S, P	0.7	1.0	3.5~4.5	0.35	1.2~1.8	0.25	1.7~2.3	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
242.1	142	铸锭	0.7	0.8	3.5~4.5	0.35	1.3~1.8	0.25	1.7~2.3	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量

（续）

代号			化学成分(质量分数,%)									其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品[1]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	(最低)
242.2	142	铸锭	0.6	0.6	3.5~4.5	0.10	1.3~1.8	—	1.7~2.3	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A242.0	A142	S	0.6	0.8	3.7~4.5	0.10	1.2~1.7	0.15~0.25	1.8~2.3	0.10	0.07~0.20	—	0.05	0.15	余量
A242.1	A142	铸锭	0.6	0.6	3.7~4.5	0.10	1.3~1.7	0.15~0.25	1.8~2.3	0.10	0.07~0.20	—	0.05	0.15	余量
A242.2	A142	铸锭	0.35	0.6	3.7~4.5	0.10	1.3~1.7	0.15~0.25	1.8~2.3	0.10	0.07~0.20	—	0.05	0.15	余量
295.0	195	S	0.7~1.5	1.0	4.0~5.0	0.35	0.03	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
295.1	195	铸锭	0.7~1.5	0.8	4.0~5.0	0.35	0.03	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
295.2	195	铸锭	0.7~1.2	0.8	4.0~5.0	0.30	0.03	—	—	0.30	0.20	—	0.05	0.15	余量
296.0	B295.0，B195	P	2.0~3.0	1.2	4.0~5.0	0.35	0.05	—	0.35	0.50	0.25	—	—	0.35	余量
296.1	B295.1，B195	铸锭	2.0~3.0	0.9	4.0~5.0	0.35	0.05	—	0.35	0.50	0.25	—	—	0.35	余量
296.2	B295.2，B195	铸锭	2.0~3.0	0.8	4.0~5.0	0.30	0.03	—	—	0.30	0.20	—	0.05	0.15	余量
301.0	—	—	9.5~1.5[㊀]	0.8~1.5	3.0~3.5	0.50~0.8	0.25~0.50	—	1.0~1.5	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
301.1	—	铸锭[10]	9.5~01.5[㊀]	0.8~1.2	3.0~3.5	0.50~0.8	0.30~0.50	—	1.0~1.5	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
302.0	—	—	9.5~10.5	0.25	2.8~3.2	—	0.7~1.2	—	1.0~1.5	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
302.1	—	铸锭[10]	9.5~10.5	0.20	2.8~3.2	—	0.8~1.2	—	1.0~1.5	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
303.0	—	—	9.5~10.5	0.8~1.5	0.20	0.50~0.8	0.45~0.7	—	—	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
303.1	—	铸锭[10]	9.5~10.5	0.8~1.2	0.20	0.50~0.8	0.50~0.7	—	—	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
308.0	A108	S，P	5.0~6.0	1.0	4.0~5.0	0.50	0.10	—	—	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
308.1	A108	铸锭	5.0~6.0	0.8	4.0~5.0	0.50	0.10	—	—	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
308.2	A108	铸锭	5.0~6.0	0.8	4.0~5.0	0.30	0.10	—	—	0.50	0.20	—	—	0.50	余量
318.0	—	S，P	5.5~6.5	1.0	3.0~4.0	0.50	0.10~0.6	—	0.35	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
318.1	—	铸锭	5.5~6.5	0.8	3.0~4.0	0.50	0.15~0.6	—	0.35	0.9	0.25	—	—	0.50	余量
319.0	319，所有铸造	S，P	5.5~6.5	1.0	3.0~4.0	0.50	0.10	—	0.35	1.0	0.25	—	—	0.50	余量

㊀ 原版错误，应为10.5。——译者注。

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）											其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品①	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
319.1	319，所有铸造	铸锭	5.5～6.5	0.8	3.0～4.0	0.50	0.10	—	0.35	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
319.2	319，所有铸造	铸锭	5.5～6.5	0.6	3.0～4.0	0.10	0.10	—	0.10	0.10	0.20	—	—	0.20	余量
A319.0	—	S，P	5.5～6.5	1.0	3.0～4.0	0.50	0.10	—	0.35	3.0	0.25	—	—	0.50	余量
A319.1	—	铸锭	5.5～6.5	0.8	3.0～4.0	0.50	0.10	—	0.35	3.0	0.25	—	—	0.50	余量
B319.0	SAE 329	S，P	5.5～6.5	1.2	3.0～4.0	0.8	0.10～0.50	—	0.50	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
B319.1	—	铸锭	5.5～6.5	0.9	3.0～4.0	0.8	0.15～0.50	—	0.50	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
320.0	—	S，P	5.0～8.0	1.2	2.0～4.0	0.8	0.05～0.6	—	0.35	3.0	0.25	—	—	0.50	余量
320.1	—	铸锭	5.0～8.0	0.9	2.0～4.0	0.8	0.10～0.6	—	0.35	3.0	0.25	—	—	0.50	余量
332.0	F332.0，F132	P	8.5～10.5	1.2	2.0～4.0	0.50	0.50～1.5	—	0.50	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
332.1	F332.1，F132	铸锭	8.5～10.5	0.9	2.0～4.0	0.50	0.6～1.5	—	0.50	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
332.2	F332.2，F132	铸锭	8.5～10.0	0.6	2.0～4.0	0.10	0.9～1.3	—	0.10	0.10	0.20	—	—	0.30	余量
333.0	333	P	8.0～10.0	1.0	3.0～4.0	0.50	0.05～0.50	—	0.50	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
333.1	333	铸锭	8.0～10.0	0.8	3.0～4.0	0.50	0.10～0.50	—	0.50	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
A333.0	—	P	8.0～10.0	1.0	3.0～4.0	0.50	0.05～0.50	—	0.50	3.0	0.25	—	—	0.50	余量
A333.1	—	铸锭	8.0～10.0	0.8	3.0～4.0	0.50	0.10～0.50	—	0.50	3.0	0.25	—	—	0.50	余量
336.0	A332.0，A132	P	11.0～13.0	1.2	0.50～1.5	0.35	0.7～1.3	—	2.0～3.0	0.35	0.25	—	0.05	—	余量
336.1	A332.1，A132	铸锭	11.0～13.0	0.9	0.50～1.5	0.35	0.8～1.3	—	2.0～3.0	0.35	0.25	—	0.05	—	余量
336.2	A332.2，A132	铸锭	11.0～13.0	0.9	0.50～1.5	0.10	0.9～1.3	—	2.0～3.0	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
339.0	Z332.0，Z132	P	11.0～13.0	1.2	1.5～3.0	0.50	0.50～1.5	—	0.50～1.5	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
339.1	Z332.1，Z132	铸锭	11.0～13.0	0.9	1.5～3.0	0.50	0.6～1.5	—	0.50～1.5	1.0	0.25	—	—	0.50	余量
354.0	354	P	8.6～9.4	0.20	1.6～2.0	0.10	0.40～0.6	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
354.1	354	铸锭	8.6～9.4	0.15	1.6～2.0	0.10	0.45～0.6	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
355.0	355	S，P	4.5～5.5	0.6⑪	1.0～1.5	0.50⑪	0.40～0.6	0.25	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）										其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品[1]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
355.1	355	铸锭	4.5~5.5	0.50[11]	1.0~1.5	0.50[11]	0.45~0.6	0.25	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
355.2	355	铸锭	4.5~5.5	0.14~0.25	1.0~1.5	0.05	0.50~0.6	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
A355.0	—	S，P	4.5~5.5	0.09	1.0~1.5	0.05	0.45~0.6	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.05	0.15	余量
A355.2	—	铸锭	4.5~5.5	0.06	1.0~1.5	0.03	0.50~0.6	—	—	0.03	0.04~0.20	—	0.03	0.10	余量
C355.0	C355	S，P	4.5~5.5	0.20	1.0~1.5	0.10	0.40~0.6	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
C355.1	—	铸锭	4.5~5.5	0.15	1.0~1.5	0.10	0.45~0.6	—	—	0.10	020[⊖]	—	0.05	0.15	余量
C355.2	C355	铸锭	4.5~5.5	0.13	1.0~1.5	0.05	0.50~0.6	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
356.0	356	S，P	6.5~7.5	0.6[11]	0.25	0.35[11]	0.20~0.45	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
356.1	356	铸锭	6.5~7.5	0.50[11]	0.25	0.35[11]	0.25~0.45	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
356.2	356	铸锭	6.5~7.5	0.13~0.25	0.10	0.05	0.30~0.45	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
A356.0	A356	S，P	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.25~0.45	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A356.1	—	铸锭	6.5~7.5	0.15	0.20	0.10	0.30~0.45	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A356.2	A356	铸锭	6.5~7.5	0.12	0.10	0.05	0.30~0.45	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
B356.0	—	S，P	6.5~7.5	0.09	0.05	0.05	0.25~0.45	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.05	0.15	余量
B356.2	—	铸锭	6.5~7.5	0.06	0.03	0.03	0.30~0.45	—	—	0.03	0.04~0.20	—	0.03	0.10	余量
C356.0	—	S，P	6.5~7.5	0.07	0.05	0.05	0.25~0.45	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.05	0.15	余量
C356.2	—	铸锭	6.5~7.5	0.04	0.03	0.03	0.30~0.45	—	—	0.03	0.04~0.20	—	0.03	0.10	余量
F356.0	—	S，P	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.17~0.25	—	—	0.10	0.04~0.20	—	0.05	0.15	余量
F356.2	—	铸锭	6.5~7.5	0.12	0.10	0.05	0.17~0.25	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.05	0.15	余量
357.0	357	S，P	6.5~7.5	0.15	0.05	0.03	0.45~0.6	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
357.1	357	铸锭	6.5~7.5	0.12	0.05	0.03	0.45~0.6	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
A357.0	A357	S，P	6.5~7.5	0.20	0.20	0.10	0.40~0.7	—	—	0.10	0.04~0.20	—	0.05[12]	0.15	余量

⊖ 原版错误，应为0.20。——译者注。

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）											其他		Al
AA 编号 No.	原来牌号	产品[1]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
A357.2	A357	铸锭	6.5~7.5	0.12	0.10	0.05	0.45~0.7	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.03[12]	0.10	余量
B357.0	—	S，P	6.5~7.5	0.09	0.05	0.05	0.40~0.6	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.05	0.15	余量
B357.2	—	铸锭	6.5~7.5	0.06	0.03	0.03	0.45~0.6	—	—	0.03	0.04~0.20	—	0.03	0.10	余量
C357.0	—	S，P	6.5~7.5	0.09	0.05	0.05	0.45~0.7	—	—	0.05	0.04~0.20	—	0.05[12]	0.15	余量
C357.2	—	铸锭	6.5~7.5	0.06	0.03	0.03	0.50~0.7	—	—	0.03	0.04~0.20	—	0.03[12]	0.10	余量
D357.0	—	S	6.5~7.5	0.20	—	0.10	0.55~0.6	—	—	—	0.10~0.20	—	0.05[12]	0.15	余量
358.0	B358.0，Tens-50	S，P	7.6~8.6	0.30	0.20	0.20	0.40~0.6	0.20	—	0.20	0.10~0.20	—	0.05[13]	0.15	余量
358.2	B358.2，Tens-50	铸锭	7.6~8.6	0.20	0.10	0.10	0.45~0.6	0.05	—	0.10	0.12~0.20	—	0.05[14]	0.15	余量
359.0	359	S，P	8.5~9.5	0.20	0.20	0.10	0.50~0.7	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
359.2	359	铸锭	8.5~9.5	0.12	0.10	0.10	0.55~0.7	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A359.0	—	—	8.5~9.5	0.25	0.20	0.10	0.40~0.6	—	—	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
A359.1	—	铸锭[10]	8.5~9.5	0.20	0.20	0.10	0.45~0.6	—	—	0.05	0.20	—	0.03	0.10	余量
360.0[15]	360	D	9.0~10.0	2.0	0.6	0.35	0.40~0.6	—	0.50	0.50	—	0.15	—	0.25	余量
360.2	360	铸锭	9.0~10.0	0.7~1.1	0.10	0.10	0.45~0.6	—	0.10	0.10	—	0.10	—	0.20	余量
A360.0[15]	A360	D	9.0~10.0	1.3	0.6	0.35	0.40~0.6	—	0.50	0.50	—	0.15	—	0.25	余量
A360.1[15]	A360	铸锭	9.0~10.0	1.0	0.6	0.35	0.45~0.6	—	0.50	0.40	—	0.15	—	0.25	余量
A360.2	A360	铸锭	9.0~10.0	0.6	0.10	0.05	0.45~0.6	—	—	0.05	—	—	0.05	0.15	余量
361.0	—	D	9.5~10.5	1.1	0.50	0.25	0.40~0.6	0.20~0.30	0.20~0.30	0.50	0.20	0.10	0.05	0.15	余量
361.1	—	铸锭	9.5~10.5	0.8	0.50	0.25	0.45~0.6	0.20~0.30	0.20~0.30	0.40	0.20	0.10	0.05	0.15	余量
363.0	363	S，P	4.5~6.0	1.1	2.5~3.5	[16]	0.15~0.40	[16]	0.25	3.0~4.5	0.20	0.25	[17]	0.30	余量
363.1	363	铸锭	4.5~6.0	0.8	2.5~3.5	[16]	0.20~0.40	[16]	0.25	3.0~4.5	0.20	0.25	[17]	0.30	余量
364.0	364	D	7.5~9.5	1.5	0.20	0.10	0.20~0.40	0.25~0.50	0.15	0.15	—	0.15	0.05[18]	0.15	余量
364.2	364	铸锭	7.5~9.5	0.7~1.1	0.20	0.10	0.25~0.40	0.25~0.50	0.15	0.15	—	0.15	0.05[18]	0.15	余量

（续）

代号		化学成分(质量分数,%)										其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品[①]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	(最低)
369.0	特殊 K-9	D	11.0~12.0	1.3	0.50	0.35	0.25~0.45	0.30~0.40	0.05	1.0	—	0.10	0.05	0.15	余量
369.1	特殊 K-9	铸锭	11.0~12.0	1.0	0.50	0.35	0.30~0.45	0.30~0.40	0.05	0.9	—	0.10	0.05	0.15	余量
380.0[⑮]	380	D	7.5~9.5	2.0	3.0~4.0	0.50	0.10	—	0.50	3.0	—	0.35	—	0.50	余量
380.2	380	铸锭	7.5~9.5	0.7~1.1	3.0~4.0	0.10	0.10	—	0.10	0.10	—	0.10	—	0.20	余量
A380.0[⑮]	A380	D	7.5~9.5	1.3	3.0~4.0	0.50	0.10	—	0.50	3.0	—	0.35	—	0.50	余量
A380.1	A380	铸锭	7.5~9.5	1.0	3.0~4.0	0.50	0.10	—	0.50	2.9	—	0.35	—	0.50	余量
A380.2	A380	铸锭	7.5~9.5	0.6	3.0~4.0	0.10	0.10	—	0.10	0.10	—	—	0.05	0.15	余量
B380.0	A380	D	7.5~9.5	1.3	3.0~4.0	0.50	0.10	—	0.50	1.0	—	0.35	—	0.50	余量
B380.1	A380	铸锭	7.5~9.5	1.0	3.0~4.0	0.50	0.10	—	0.50	0.9	—	0.35	—	0.50	余量
C380.0	—	D	7.5~9.5	1.3	3.0~4.0	0.50	0.10~0.30	—	0.50	3.0	—	0.35	—	0.50	余量
C380.1	—	铸锭	7.5~9.5	1.0	3.0~4.0	0.50	0.15~0.30	—	0.50	2.9	—	0.35	—	0.50	余量
D380.0	—	D	7.5~9.5	1.3	3.0~4.0	0.50	0.10~0.30	—	0.50	1.0	—	0.35	—	0.50	余量
D380.1	—	铸锭	7.5~9.5	1.0	3.0~4.0	0.50	0.15~0.30	—	0.50	0.9	—	0.35	—	0.50	余量
383.0	—	D	9.5~11.5	1.3	2.0~3.0	0.50	0.10	—	0.30	3.0	—	0.15	—	0.50	余量
383.1	—	铸锭	9.5~11.5	1.0	2.0~3.0	0.50	0.10	—	0.30	2.9	—	0.15	—	0.50	余量
383.2	—	铸锭	9.5~11.5	0.6~1.0	2.0~3.0	0.10	0.10	—	0.10	0.10	—	0.10	—	0.20	余量
A383.0	—	D	9.5~11.5	1.3	2.0~3.0	0.50	0.10~0.30	—	0.30	3.0	—	0.15	—	0.50	余量
A383.1	—	铸锭	9.5~11.5	1.0	2.0~3.0	0.50	0.15~0.30	—	0.30	2.9	—	0.15	—	0.50	余量
384.0	384	D	10.5~12.0	1.3	3.0~4.5	0.50	0.10	—	0.50	3.0	—	0.35	—	0.50	余量
384.1	384	铸锭	10.5~12.0	1.0	3.0~4.5	0.50	0.10	—	0.50	2.9	—	0.35	—	0.50	余量
384.2	384	铸锭	10.5~12.0	0.6~1.0	3.0~4.5	0.10	0.10	—	0.10	0.10	—	0.10	—	0.20	余量
A384.0	384	D	10.5~12.0	1.3	3.0~4.5	0.50	0.10	—	0.50	1.0	—	0.35	—	0.50	余量
A384.1	384	铸锭	10.5~12.0	1.0	3.0~4.5	0.50	0.10	—	0.50	0.9	—	0.35	—	0.50	余量

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）										其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品[1]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
B384.0	—	D	10.5~12.0	1.3	3.0~4.5	0.50	0.10~0.30	—	0.50	1.0	—	0.35	—	0.50	余量
B384.1	—	铸锭	10.5~12.0	1.0	3.0~4.5	0.50	0.15~0.30	—	0.50	0.9	—	0.35	—	0.50	余量
C384.0	—	D	10.5~12.0	1.3	3.0~4.5	0.50	0.10~0.30	—	0.50	3.0	—	0.35	—	0.50	余量
C384.1	—	铸锭	10.5~12.0	1.0	3.0~4.5	0.50	0.15~0.30	—	0.50	2.9	—	0.35	—	0.50	余量
385.0	B384.0，384	D	11.0~13.0	2.0	2.0~4.0	0.50	0.30	—	0.50	3.0	—	0.30	—	0.50	余量
385.1	B384.1，384	铸锭	11.0~13.0	1.1	2.0~4.0	0.50	0.30	—	0.50	2.9	—	0.30	—	0.50	余量
390.0	390	D	16.0~18.0	1.3	4.0~5.0	0.10	0.45~0.65[19]	—	—	0.10	0.20	—	0.10	0.20	余量
390.2	390	铸锭	16.0~18.0	0.6~1.0	4.0~5.0	0.10	0.50~0.65[19]	—	—	0.10	0.20	—	0.10	0.20	余量
A390.0	A390	S，P	16.0~18.0	0.50	4.0~5.0	0.10	0.45~0.65[19]	—	—	0.10	0.20	—	0.10	0.20	余量
A390.1	A390	铸锭	16.0~18.0	0.40	4.0~5.0	0.10	0.50~0.65[19]	—	—	0.10	0.20	—	0.10	0.20	余量
B390.0	—	D	16.0~18.0	1.3	4.0~5.0	0.50	0.45~0.65[19]	—	0.10	1.5	0.20	—	0.10	0.20	余量
B390.1	—	铸锭	16.0~18.0	1.0	4.0~5.0	0.50	0.50~0.65[19]	—	0.10	1.4	0.20	—	0.10	0.20	余量
392.0	392	D	18.0~20.0	1.5	0.40~0.8	0.20~0.6	0.8~1.2	—	0.50	0.50	0.20	0.30	0.15	0.50	余量
392.1	392	铸锭	18.0~20.0	1.1	0.40~0.8	0.20~0.6	0.9~1.2	—	0.50	0.40	0.20	0.30	0.15	0.50	余量
393.0	Vanasil	S，P，D	21.0~23.0	1.3	0.7~1.1	0.10	0.7~1.3	—	2.0~2.5	0.10	0.10~0.20	—	0.05[20]	0.15	余量
393.1	Vanasil	铸锭	21.0~23.0	1.0	0.7~1.1	0.10	0.8~1.3	—	2.0~2.5	0.10	0.10~0.20	—	0.05[20]	0.15	余量
393.2	Vanasil	铸锭	21.0~23.0	0.8	0.7~1.1	0.10	0.8~1.3	—	2.0~2.5	0.10	0.10~0.20	—	0.05[20]	0.15	余量

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）											其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品①	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
408.2[21]	—	铸锭	8.5 ~ 9.5	0.6 ~ 1.3	0.10	0.10	—	—	—	0.10	—	—	0.10	0.20	余量
409.2[21]	—	铸锭	9.0 ~ 10.0	0.6 ~ 1.3	0.10	0.10	—	—	—	0.10	—	—	0.10	0.20	余量
411.2[21]	—	铸锭	10.0 ~ 12.0	0.6 ~ 1.3	0.20	0.10	—	—	—	0.10	—	—	0.10	0.20	余量
413.0[15]	13	D	11.0 ~ 13.0	2.0	1.0	0.35	0.10	—	0.50	0.50	—	0.15	—	0.25	余量
413.2	13	铸锭	11.0 ~ 13.0	0.7 ~ 1.1	0.10	0.10	0.07	—	0.10	0.10	—	0.10	—	0.20	余量
A413.0[15]	A13	D	11.0 ~ 13.0	1.3	1.0	0.35	0.10	—	0.50	0.50	—	0.15	—	0.25	余量
A413.1[15]	A13	铸锭	11.0 ~ 13.0	1.0	1.0	0.35	0.10	—	0.50	0.40	—	0.15	—	0.25	余量
A413.2	A13	铸锭	11.0 ~ 13.0	0.6	0.10	0.05	0.05	—	0.05	0.05	—	0.05	—	0.10	余量
B413.0	—	S, P	11.0 ~ 13.0	0.50	0.10	0.35	0.05	—	0.05	0.10	0.25	—	0.05	0.20	余量
B413.1	—	铸锭	11.0 ~ 13.0	0.40	0.10	0.35	0.05	—	0.05	0.10	0.25	—	0.05	0.20	余量
435.2[22]	—	铸锭	3.3 ~ 3.9	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.10	—	—	0.05	0.20	余量
443.0	43	S, P	4.5 ~ 6.0	0.8	0.6	0.50	0.05	0.25	—	0.50	0.25	—	—	0.35	余量
443.1	43	铸锭	4.5 ~ 6.0	0.6	0.6	0.50	0.05	0.25	—	0.50	0.25	—	—	0.35	余量
443.2	43	铸锭	4.5 ~ 6.0	0.6	0.10	0.10	0.05	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A443.0	43(0.30max Cu)	S	4.5 ~ 6.0	0.8	0.30	0.50	0.05	0.25	—	0.50	0.25	—	—	0.35	余量
A443.1	43(0.30max Cu)	铸锭	4.5 ~ 6.0	0.6	0.30	0.50	0.05	0.25	—	0.50	0.25	—	—	0.35	余量
B443.0	43(0.15max Cu)	S, P	4.5 ~ 6.0	0.8	0.15	0.35	0.05	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
B443.1	43(0.15max Cu)	铸锭	4.5 ~ 6.0	0.6	0.15	0.35	0.05	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
C443.0	A43	D	4.5 ~ 6.0	2.0	0.6	0.35	0.10	—	0.50	0.50	—	0.15	—	0.25	余量
C443.1	A43	铸锭	4.5 ~ 6.0	1.1	0.6	0.35	0.10	—	0.50	0.40	—	0.15	—	0.25	余量
C443.2	A43	铸锭	4.5 ~ 6.0	0.7 ~ 1.1	0.10	0.10	0.05	—	—	0.10	—	—	0.05	0.15	余量

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）										其他		Al（最低）
AA编号 No.	原来牌号	产品[①]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	
444.0	—	S，P	6.5～7.5	0.6	0.25	0.35	0.10	—	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
444.2	—	铸锭	6.5～7.5	0.13～0.25	0.10	0.05	0.05	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
A444.0	A344	P	6.5～7.5	0.20	0.10	0.10	0.05	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A444.1	—	铸锭	6.5～7.5	0.15	0.10	0.10	0.05	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
A444.2	A344	铸锭	6.5～7.5	0.12	0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	0.20	—	0.05	0.15	余量
445.2[㉑]	B444.2	铸锭	6.5～7.5	0.6～1.3	0.10	0.10	—	—	—	0.10	—	—	0.10	0.20	余量
511.0	F514.0，F214	S	0.30～0.7	0.50	0.15	0.35	3.5～4.5	—	—	0.15	0.25	—	0.05	0.15	余量
511.1	F514.1，F214	铸锭	0.30～0.7	0.40	0.15	0.35	3.6～4.5	—	—	0.15	0.25	—	0.05	0.15	余量
511.2	F514.2，F214	铸锭	0.30～0.7	0.30	0.10	0.10	3.6～4.5	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
512.0	B514.0，B214	S	1.4～2.2	0.6	0.35	0.8	3.5～4.5	0.25	—	0.35	0.25	—	0.05	0.15	余量
512.2	B514.2，B214	铸锭	1.4～2.2	0.30	0.10	0.10	3.6～4.5	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
513.0	A514.0，A214	P	0.30	0.40	0.10	0.30	3.5～4.5	—	—	1.4～2.2	0.20	—	0.05	0.15	余量
513.2	A514.2，A214	铸锭	0.30	0.30	0.10	0.10	3.6～4.5	—	—	1.4～2.2	0.20	—	0.05	0.15	余量
514.0	214	S	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5～4.5	—	—	0.15	0.25	—	0.05	0.15	余量
514.1	214	铸锭	0.35	0.40	0.15	0.35	3.6～4.5	—	—	0.15	0.25	—	0.05	0.15	余量
514.2	214	铸锭	0.30	0.30	0.10	0.10	3.6～4.5	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
515.0	L514.0，L214	D	0.50～1.0	1.3	0.20	0.40～0.6	2.5～4.0	—	—	0.10	—	—	0.05	0.15	余量
515.2	L514.2，L214	铸锭	0.50～1.0	0.6～1.0	0.10	0.40～0.6	2.7～4.0	—	—	0.05	—	—	0.05	0.15	余量
516.0	—	D	0.30～1.5	0.35～1.0	0.30	0.15～0.40	2.5～4.5	—	0.25～0.40	0.20	0.10～0.20	0.10	0.05[㉓]	—	余量
516.1	—	铸锭	0.30～1.5	0.35～0.7	0.30	0.15～0.40	2.6～4.5	—	0.25～0.40	0.20	0.10～0.20	0.10	0.05[㉓]	—	余量
518.0	218	D	0.35	1.8	0.25	0.35	7.5～8.5	—	0.15	0.15	—	0.15	—	0.25	余量

（续）

代号			化学成分（质量分数，%）										其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品[①]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
518.1	218	铸锭	0.35	1.1	0.25	0.35	7.6～8.5	—	0.15	0.15	—	0.15	—	0.25	余量
518.2	218	铸锭	0.25	0.7	0.10	0.10	7.6～8.5	—	0.05	—	—	0.05	—	0.10	余量
520.0	220	S	0.25	0.30	0.25	0.15	9.5～10.6	—	—	0.15	0.25	—	0.05	0.15	余量
520.2	220	铸锭	0.15	0.20	0.20	0.10	9.6～10.6	—	—	0.10	0.20	—	0.05	0.15	余量
535.0	Almag 35	S	0.15	0.15	0.05	0.10～0.25	6.2～7.5	—	—	—	0.10～0.25	—	0.05[㉔]	0.15	余量
535.2	Almag 35	铸锭	0.10	0.10	0.05	0.10～0.25	6.6～7.5	—	—	—	0.10～0.25	—	0.05[㉕]	0.15	余量
A535.0	A218	S	0.20	0.20	0.10	0.10～0.25	6.5～7.5	—	—	—	0.25	—	0.05	0.15	余量
A535.1	A218	铸锭	0.20	0.15	0.10	0.10～0.25	6.6～7.5	—	—	—	0.25	—	0.05	0.15	余量
B535.0	B218	S	0.15	0.15	0.10	0.05	6.5～7.5	—	—	—	0.10～0.25	—	0.05	0.15	余量
B535.2	B218	铸锭	0.10	0.12	0.05	0.05	6.6～7.5	—	—	—	0.10～0.25	—	0.05	0.15	余量
705.0	603，Temalloy 5	S，P	0.20	0.8	0.20	0.40～0.6	1.4～1.8	0.20～0.40	—	2.7～3.3	0.25	—	0.05	0.15	余量
705.1	603，Temalloy 5	铸锭	0.20	0.6	0.20	0.40～0.6	1.5～1.8	0.20～0.40	—	2.7～3.3	0.25	—	0.05	0.15	余量
707.0	607，Temalloy 7	S，P	0.20	0.8	0.20	0.40～0.6	1.8～2.4	0.20～0.40	—	4.0～4.5	0.25	—	0.05	0.15	余量
707.1	607，Temalloy 7	铸锭	0.20	0.6	0.20	0.40～0.6	1.9～2.4	0.20～0.40	—	4.0～4.5	0.25	—	0.05	0.15	余量
710.0	A712.0，A612	S	0.15	0.50	0.35～0.6	0.05	0.6～0.8	—	—	6.0～7.0	0.25	—	0.05	0.15	余量
710.1	A712.1，A612	铸锭	0.15	0.40	0.35～0.6	0.05	0.65～0.8	—	—	6.0～7.0	0.25	—	0.05	0.15	余量
711.0	C712.0，C612	P	0.30	0.7～1.4	0.35～0.6	0.05	0.25～0.45	—	—	6.0～7.0	0.20	—	0.05	0.15	余量
711.1	C712.1，C612	铸锭	0.30	0.7～1.1	0.35～0.6	0.05	0.30～0.45	—	—	6.0～7.0	0.20	—	0.05	0.15	余量
712.0	D712.0，D612，40E	S	0.30	0.50	0.25	0.10	0.50～0.65[⑲]	0.40～0.6	—	5.0～6.5	0.15～0.25	—	0.05	0.20	余量
712.2	D712.2，D612，40E	铸锭	0.15	0.40	0.25	0.10	0.50～0.65[⑲]	0.40～0.6	—	5.0～6.5	0.15～0.25	—	0.05	0.20	余量

（续）

代号		化学成分（质量分数，%）										其他		Al
AA编号 No.	原来牌号	产品①	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	单个	总量	（最低）
713.0	613，Tenzaloy	S，P	0.25	1.1	0.40~1.0	0.6	0.20~0.50	0.35	0.15	7.0~8.0	0.25	—	0.10	0.25	余量
713.1	613，Tenzaloy	铸锭	0.25	0.8	0.40~1.0	0.6	0.25~0.50	0.35	0.15	7.0~8.0	0.25	—	0.10	0.25	余量
771.0	Precedent71A	S	0.15	0.15	0.10	0.10	0.8~1.0	0.06~0.20	—	6.5~7.5	0.10~0.20	—	0.05	0.15	余量
771.2	Precedent71A	铸锭	0.10	0.10	0.10	0.10	0.85~1.0	0.06~0.20	—	6.5~7.5	0.10~0.20	—	0.05	0.15	余量
772.0	B771.0，Precedent71B	S	0.15	0.15	0.10	0.10	0.6~0.8	0.06~0.20	—	6.0~7.0	0.10~0.20	—	0.05	0.15	余量
772.2	B771.2，Precedent 71B	铸锭	0.10	0.10	0.10	0.10	0.65~0.8	0.06~0.20	—	6.0~7.0	0.10~0.20	—	0.05	0.15	余量
850.0	750	S，P	0.7	0.7	0.7~1.3	0.10	0.10	—	0.7~1.3	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
850.1	750	铸锭	0.7	0.50	0.7~1.3	0.10	0.10	—	0.7~1.3	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
851.0	A850.0，A750	S，P	2.0~3.0	0.7	0.7~1.3	0.10	0.10	—	0.30~0.7	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
851.1	A850.1，A750	铸锭	2.0~3.0	0.50	0.7~1.3	0.10	0.10	—	0.30~0.7	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
852.0	B850.0，B750	S，P	0.40	0.7	1.7~2.3	0.10	0.6~0.9	—	0.9~1.5	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
852.1	B850.1，B750	铸锭	0.40	0.50	1.7~2.3	0.10	0.7~0.9	—	0.9~1.5	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
853.0	XC850.0，XC750	S，P	5.5~6.5	0.7	3.0~4.0	0.50	—	—	—	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量
853.2	XC850.2，XC750	铸锭	5.5~6.5	0.50	3.0~4.0	0.10	—	—	—	—	0.20	5.5~7.0	—	0.30	余量

①D，金属型；P，永久型；S，砂型。其他产品尽管未列入也可适用所示成分。 ②0.025%最大 Mg+Cr+Ti+V。 ③Fe/Si之比最小为2.5。 ④Fe/Si之比最小为2.0。 ⑤Fe/Si之比最小为1.5。 ⑥0.40%~1.0% Ag。 ⑦0.50%~1.0% Ag。 ⑧最高0.50% Ti+Zr。 ⑨0.20%~0.30% Sb、0.20%~0.30% Co、0.10%~0.30% Zr。 ⑩主要用于制造金属基复合材料。 ⑪如果Fe超过0.45%，则Mg的含量不得低于Fe含量的一半。 ⑫0.04%~0.07% Be。 ⑬0.10%~0.30% Be。 ⑭0.15%~0.30% Be。 ⑮A360.1、A380.1和A413.1的铸锭分别用于生产360.0、A360.0、380.0、A380.0、413.0以及A413.0的铸件。 ⑯最高0.8% Mg+Cr。 ⑰最高0.25% Pb。 ⑱0.02%~0.04% Be。 ⑲用于表示Mg质量分数的小数位数与其规格不同。 ⑳0.08%~0.15% V。 ㉑408.2、409.2、411.2和445.2用于钢的镀层。 ㉒与Zn一起用于钢的镀层。 ㉓最高0.10% Pb。 ㉔0.003%~0.007% Be、最高0.005% B。 ㉕0.003%~0.007% Be、最高0.002% B。

引自铝业协会。

表 3.1-12 铝和铝合金对应于铝业协会(AA)编号的统一编号系统(UNS)的编号

AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号
铸件/铸锭		铸件/铸锭		铸件/铸锭		铸件/铸锭		铸件/铸锭	
100.1	A01001	249.2	A02492	343.1	A03431	390.0	A03900	518.2	A05182
130.1	A01301	295.0	A02950	354.0	A03540	390.2	A03902	520.0	A05200
150.1	A01501	295.1	A02951	354.1	A03541	392.0	A03920	520.2	A05202
160.1	A01601	295.2	A02952	355.0	A03550	392.1	A03921	535.0	A05350
170.1	A01701	296.0	A02960	355.1	A03551	393.0	A03930	535.2	A05352
201.0	A02010	296.1	A02961	355.2	A03552	393.1	A03931	705.0	A07050
201.2	A02012	296.2	A02962	356.0	A03560	393.2	A03932	705.1	A07051
202.0	A02020	305.0	A03050	356.1	A03561	408.2	A04082	707.0	A07070
202.2	A02022	305.2	A03052	356.2	A03562	409.2	A04092	707.1	A07071
203.0	A02030	308.0	A03080	357.0	A03570	411.2	A04112	710.0	A07100
203.2	A02032	308.1	A03081	357.1	A03571	413.0	A04130	710.1	A07101
204.0	A02040	308.2	A03082	358.0	A03580	413.2	A04132	711.0	A07110
204.2	A02042	318.0	A03180	358.2	A03582	435.2	A04352	711.1	A07111
206.0	A02060	318.1	A03181	359.0	A03590	443.0	A04430	712.0	A07120
206.2	A02062	319.0	A03190	359.2	A03592	443.1	A04431	712.2	A07122
208.0	A02080	319.1	A03191	360.0	A03600	443.2	A04432	713.0	A07130
208.1	A02081	319.2	A03192	360.2	A03602	444.0	A04440	713.1	A07131
208.2	A02082	320.0	A03200	361.0	A03610	444.2	A04442	771.0	A07710
213.0	A02130	320.1	A03201	361.1	A03611	445.2	A04452	771.2	A07712
213.1	A02131	324.0	A03240	363.0	A03630	511.0	A05110	772.0	A07720
222.0	A02220	324.1	A03241	363.1	A03631	511.1	A05111	772.2	A07722
222.1	A02221	324.2	A03242	364.0	A03640	511.2	A05112	850.0	A08500
224.0	A02240	328.0	A03280	364.2	A03642	512.0	A05120	850.1	A08501
224.2	A02242	328.1	A03281	369.0	A03690	512.2	A05122	851.0	A08510
238.0	A02380	332.0	A03320	369.1	A03691	513.0	A05130	851.1	A08511
238.1	A02381	332.1	A03321	380.0	A03800	513.2	A05132	852.0	A08520
238.2	A02382	332.2	A03322	380.2	A03802	514.0	A05140	852.1	A08521
240.0	A02400	333.0	A03330	383.0	A03830	514.1	A05141	853.0	A08530
240.1	A02401	333.1	A03331	383.1	A03831	514.2	A05142	853.2	A08532
242.0	A02420	336.0	A03360	383.2	A03832	515.0	A05150	A201.0	A12010
242.1	A02421	336.1	A03361	384.0	A03840	515.2	A05152	A201.1	A12011
242.2	A02422	336.2	A03362	384.1	A03841	516.0	A05160	A201.2	A12012
243.0	A02430	339.0	A03390	384.2	A03842	516.1	A05161	A206.0	A12060
243.1	A02431	339.1	A03391	385.0	A03850	518.0	A05180	A206.2	A12062
249.0	A02490	343.0	A03430	385.1	A03851	518.1	A05181	A242.0	A12420

（续）

AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号
铸件/铸锭		**铸件/铸锭**		**铸件/铸锭**		**锻压铝合金**		**锻压铝合金**	
A242.1	A12421	A444.1	A14441	D357.0	A43570	1199	A91199	2036	A92036
A242.2	A12422	A535.0	A15350	D380.0	A43800	1200	A91200	2037	A92037
A305.0	A13050	A535.1	A15351	D380.1	A43801	1230	A91230	2038	A92038
A305.1	A13051	B201.0	A22010	F356.0	A63560	1235	A91235	2048	A92048
A305.2	A13052	B237.0	A23570	F356.2	A63562	1250	A91250	2090	A92090
A319.0	A13190	B319.0	A23190	**锻压铝合金**		1260	A91260	2091	A92091
A319.1	A13191	B319.1	A23191	1030	A91030	1275	A91275	2117	A92117
A333.0	A13330	B356.0	A23560	1035	A91035	1285	A91285	2124	A92124
A333.1	A13331	B356.2	A23562	1040	A91040	1345	A91345	2214	A92214
A355.0	A13550	B357.2	A23572	1045	A91045	1350	A91350	2218	A92218
A355.2	A13552	B380.0	A23800	1050	A91050	1370	A91370	2219	A92219
A356.0	A13560	B380.1	A23801	1055	A91055	1385	A91385	2224	A92224
A356.2	A13562	B384.1	A23841	1060	A91060	1435	A91435	2304	A92034[1]
A356.1	A13561	B390.0	A23900	1065	A91065	1445	A91445	2319	A92319
A357.0	A13570	B390.1	A23901	1070	A91070	1450	A91450	2324	A92324
A357.2	A13572	B413.0	A24130	1075	A91075	2001	A92001	2419	A92419
A360.0	A13600	B413.1	A24131	1080	A91080	2002	A92002	2519	A92519
A360.1	A13601	B443.0	A24430	1085	A91085	2003	A92003	2618	A92618
A360.2	A13602	B443.1	A24431	1090	A91090	2004	A92004	3002	A93002
A380.0	A13800	B535.0	A25350	1095	A91095	2005	A92005	3003	A93003
A380.1	A13801	B535.2	A25352	1098	A91098	2006	A92006	3004	A93004
A380.2	A13802	C355.0	A33550	1100	A91100	2007	A92007	3005	A93005
A383.0	A13830	C355.2	A35522	1110	A91110	2008	A92008	3006	A93006
A383.1	A13831	C355.1	A33551	1120	A91120	2009	A92009	3007	A93007
A384.0	A13840	C356.0	A33560	1135	A91135	2010	A92010	3008	A93008
A384.1	A13841	C356.2	A33562	1145	A91145	2011	A92011	3009	A93009
A390.0	A13900	C357.0	A33570	1150	A91150	2014	A92014	3010	A93010
A390.1	A13901	C357.2	A33572	1170	A91170	2017	A92017	3011	A93011
A413.0	A14130	C380.0	A33800	1175	A91175	2018	A92018	3012	A93012
A413.1	A14131	C380.1	A33801	1180	A91180	2020	A92020	3013	A93013
A413.2	A14132	C384.0	A33840	1185	A91185	2021	A92021	3014	A93014
A443.0	A14430	C384.1	A33841	1188	A91188	2024	A92024	3015	A93015
A443.1	A14431	C443.0	A34430	1190	A91190	2025	A92025	3016	A93016
A444.0	A14440	C443.1	A34431	1193	A91193	2030	A92030	3017	A93017
A444.2	A14442	C443.2	A34432	1198	A91198	2031	A92031	3102	A93102

[1] 原版错误，应为 A92304。——译者注。

（续）

AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号
锻压铝合金		**锻压铝合金**		**锻压铝合金**		**锻压铝合金**		**锻压铝合金**	
3103	A93103	5013	A95013	5280	A95280	6012	A96012	6306	A96306
3104	A93104	5014	A95014	5283	A95283	6013	A96013	6351	A96351
3105	A93105	5016	A95016	5305	A95305	6014	A96014	6401	A96401
3107	A93107	5017	A95017	5310	A95310	6015	A96015	6463	A96463
3203	A93203	5034	A95034	5349	A95349	6016	A96016	6763	A96763
3204	A93204	5039	A95039	5351	A95351	6017	A96017	6863	A96863
3207	A93207	5040	A95040	5352	A95352	6053	A96053	6951	A96951
3303	A93303	5042	A95042	5356	A95356	6056	A96056	7001	A97001
3307	A93307	5043	A95043	5357	A95357	6060	A96060	7003	A97003
4002	A94002	5049	A95049	5451	A95451	6061	A96061	7004	A97004
4004	A94004	5050	A95050	5454	A95454	6063	A96063	7005	A97005
4006	A94006	5051	A95051	5456	A95456	6066	A96066	7008	A97008
4007	A94007	5052	A95052	5457	A95457	6070	A96070	7009	A97009
4008	A94008	5056	A95056	5505	A95505	6081	A96081	7010	A97010
4009	A94009	5058	A95058	5552	A95552	6082	A96082	7011	A97011
4010	A94010	5082	A95082	5554	A95554	6090	A96090	7012	A97012
4011	A94011	5083	A95083	5556	A95556	6091	A96091	7013	A97013
4013	A94013	5086	A95086	5557	A95557	6092	A96092	7014	A97014
4014	A94014	5087	A95087	5605	A95605	6101	A96101	7015	A97015
4015	A94015	5091	A95091	5652	A95652	6103	A96103	7016	A97016
4032	A94032	5110	A95110	5654	A95654	6105	A96105	7017	A97017
4043	A94043	5149	A95149	5657	A95657	6106	A96106	7018	A97018
4044	A94044	5150	A95150	5754	A95754	6110	A96110	7019	A97019
4045	A94045	5151	A95151	5854	A95854	6111	A96111	7020	A97020
4046	A94046	5154	A95154	6002	A96002	6113	A96113	7021	A97021
4047	A94047	5180	A95180	6003	A96003	6151	A96151	7022	A97022
4104	A94104	5182	A95182	6004	A96004	6162	A96162	7023	A97023
4145	A94145	5183	A95183	6005	A96005	6181	A96181	7024	A97024
4147	A94147	5205	A95205	6005A	A96005	6201	A96201	7025	A97025
4343	A94343	5210	A95210	6006	A96006	6205	A96205	7026	A97026
4543	A94543	5249	A95249	6007	A96007	6206	A96206	7027	A97027
4643	A94643	5250	A95250	6008	A96008	6253	A96253	7028	A97028
5005	A95005	5251	A95251	6009	A96009	6261	A96261	7029	A97029
5006	A95006	5252	A95252	6010	A96010	6262	A96262	7030	A97030
5010	A95010	5254	A95254	6011	A96011	6301	A96301	7031	A97031

（续）

AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号	AA 编号	UNS 编号
锻压铝合金		锻压铝合金		锻压铝合金		锻压铝合金		锻压铝合金	
7039	A97039	7090	A97090	7229	A97229	8013	A98013	8077	A98077
7046	A97046	7091	A97091	7277	A97277	8014	A98014	8079	A98079
7049	A97049	7104	A97104	7278	A97278	8015	A98015	8081	A98081
7050	A97050	7108	A97108	7472	A97472	8016	A98016	8090	A98090
7051	A97051	7109	A97109	7475	A97475	8017	A98017	8091	A98091
7055	A97055	7116	A97116	8001	A98001	8018	A98018	8111	A98111
7060	A97060	7129	A97129	8004	A98004	8020	A98020	8112	A98112
7064	A97064	7146	A97146	8005	A98005	8021	A98021	8130	A98130
7070	A97070	7149	A97149	8006	A98006	8022	A98022	8176	A98176
7072	A97072	7150	A97150	8007	A98007	8030	A98030	8177	A98177
7075	A970705	7175	A97175	8008	A98008	8040	A98040	8211	A98211
7076	A97076	7178	A97178	8009	A98009	8050	A98050	8276	A98276
7079	A97079	7179	A97179	8010	A98010	8076	A98076	8280	A98280

国际合金代号

历史上所有主要工业化国家都建有自己的铝和铝合金的标准代号系统。现在它们都分属于美国国家标准学会(ANSI)、国际标准化组织(ISO)和欧洲标准化委员会(CEN)的系统。

国际标准化组织。它已经根据某些欧洲国家所使用的系统，建立了自己的锻压铝及其合金的字母数字代号系统(ISO R209)。其主要的添加元素按照标示含量圆整到最接近0.5的要求(范围的中值)进行分辨。

5052 = AlMg2.5

5251 = AlMg2

如要求有第二种添加元素，可按照标示含量要求圆整到最接近0.1的规定进行分辨，最常见的两种元素：

6181 = AlSiMg0.8

添加元素的化学符号不应超过四种：

7050 = AlZn6CuMgZr

一种合金如果这样还是无法分辨，则可以使用括号里的字母为词尾来表示：

6063 = AlMg0.7Si

6463 = AlMg0.7Si(B)

6063A = AlMg0.7Si(A)

注意词尾(A)、(B)等不要与铝业协会的词尾相混淆。

表3.1-13对照了ISO牌号和与之相当或相似的AA合金代号。在表里列出对照的还有奥地利、加拿大、法国、德国、英国、意大利、西班牙和瑞士等国家标准的合金。其他的资料可参阅由铝业协会颁布的“锻压铝和锻压铝合金的国际合金代号和化学成分极限值的注册记录”(通常称蓝页)。

表3.1-13　国际合金代号与锻压的铝业协会(AA)合金的对照表

国际合金代号	相当/相似 AA合金	国际合金代号	相当/相似 AA合金	国际合金代号	相当/相似 AA合金	国际合金代号	相当/相似 AA合金
ISO R209		ISO R209		ISO R209		ISO R209	
Al99.5	1050 A	Al99.0Cu	1100	E-Al99.7	1370	AlCu4MgSi	2017
Al99.6	1060	Al99.0	1200	AlCu6BiPb	2011	AlCu4MgSi(A)	2017A
Al99.7	1070A	Al99.3	1230	AlCu4SiMg	2014	AlCu4Mgl	2024
Al99.8	1080A	E-Al99.5	1350	AlCu4SiMg(A)	2014A	AlCu4PbMg	2030

（续）

国际合金代号	相当/相似AA合金
ISO R209	
AlCu2.5Mg	2117
AlCu6Mn	2219
AlMn1Cu	3003
AlMn1Mg1	3004
AlMn1Mg0.5	3005
AlMn1	3103
AlMn0.5Mg0.5	3105
AlSi5	4043
AlSi5(A)	4043A
AlSi12	4047
AlSi12(A)	4047A
AlMg1(B)	5005
AlMg1.5(C)	5050
AlMg2.5	5052
AlMg5Cr	5056
AlMg5	5056A
AlMg4.5Mn0.7	5083
AlMg4	5086
AlMg3.5	5154
AlMg3.5(A)	5154A
AlMg4.5Mn0.7(A)	5183
AlMg2	5251
AlMg5Cr(A)	5356
AlMg3Mn	5454
AlMg5Mn	5456
AlMg3Mn(A)	5554
AlMg3	5754
AlSiMg	6005
AlSiMg(A)	6005A
AlMgSi	6060
AlMg1SiCu	6061
AlMg0.7Si	6063
AlMg0.7Si(A)	6063A
AlSi1MgMn	6082

国际合金代号	相当/相似AA合金
ISO R209	
E-AlMgSi	6101
E-AlMgSi(A)	6101A
AlSi1Mg0.8	6181
AlMg1SiPb	6262
AlSi1Mg0.5Mn	6351
AlZn4.5Mg1.5Mn	7005
AlZn6MgCu	7010
AlZn4.5Mg1	7020
AlZn8MgCu	7049A
AlZn6CuMgZr	7050
AlZn5.5MgCu	7075
AlZn7MgCu	7178
AlZn5.5MgCu(A)	7475
奥地利标准（Austrian Standard M3430）	
Al99	1200
Al99.5	1050
E-Al	1350
AlCuMg1	2017
AlCuMg2	2024
AlCuMg0.5	2117
AlMg5	5056
AlMgSi0.5	6063
E-AlMgSi	6101
AlZnMgCu1.5	7075
加拿大标准协会（Canadian Standard Association）	
990C	1100
CB60	2011
CG30	2117
CG42	2024
CG42Alclad	Alclad2024
CM41	2017
CN42	2018

国际合金代号	相当/相似AA合金
加拿大标准协会（Canadian Standard Association）	
CS41N	2014
CS41NAlclad	Alclad2014
CS41P	2025
GM31N	5454
GM41	5083
GM50P	5356
GM50R	5056
GR20	5052
GS10	6063
GS11N	6061
GS11P	6053
MC10	3003
S5	4043
SG11P	6151
SG121	4032
ZG62	7075
ZG62Alclad	Alclad7075
法国标准（Normes Francaises）	
A5/L	1350
A45	1100
A-G1	5050
A-G0.6	5005
A-G4MC	5086
A-GS	6063
A-GS/L	6101
A-M1	3003
A-M1G	3004
A-U4G	2017
A-U2G	2117
A-U2GN	2618
A-U4G1	2024
A-U4N	2218

国际合金代号	相当/相似AA合金
法国标准（Normes Francaises）	
A-U4SG	2014
A-S12UN	4032
A-Z5GU	7075
德国工业标准（Deutsche Industrie-Norm.）	
E-A1995	1350
AlCuBiPb	2011
AlCuMg0.5	2117
AlCuMg1	2017
AlCuMg2	2024
AlCuSiMn	2014
AlMg4.5Mn	5083
AlMgSi0.5	6063
AlSi5	4043
E-AlMgSi0.5	6101
AlZnMgCu1.5	7075
德国（Werkstoff-Nr.）	
3.0257	1350
3.1655	2011
3.1305	2117
3.1325	2017
3.1355	2024
3.1255	2014
3.3547	5083
3.3206	6063
3.2245	4043
3.3207	6101
3.4365	7075
英国标准（British Standard）	
1E	1350
91E	6101
H14	2017
H19	6063
H20	6061

（续）

国际合金代号	相当/相似AA合金
英国标准(British Standard)	
L.80, L.81	5052
L.86	2117
L.87	2017
L.93, L.94	2014A
L.95, L.96	7075
L.97, L.98	2024
2L.55, 2L.56	5052
2L.58	5056
3L.44	5050
5L.37	2017
6L.25	2218
N8	5083
N21	4043

国际合金代号	相当/相似AA合金
英国技术发展管理局(Directorate of Technical Development)	
150A	2017
324A	4032
372B	6063
717, 724, 731A	6063
745, 5014, 5084	2618
5090	2024
5100	Alclad2024
意大利国家标准协会(Unificazione Nazionale Italiana)	
P-AlCu4MgMn	2017
P-AlCu4.5MgMn	2024

国际合金代号	相当/相似AA合金
意大利国家标准协会(Unificazione Nazionale Italiana)	
P-AlCu4.5MgMnplacc.	Alclad2024
P-AlCu2.5MgSi	2117
P-AlCu4.4SiMnMg	2014
P-AlCu4.4SiMnMgplacc.	Alclad2014
P-AlMg0.9	5657
P-AlMg1.5	5050
P-AlMg2.5	5052
P-AlSi0.4Mg	6063
P-AlSi0.5Mg	6101
西班牙(Una Norma Espanol)	
A199.5E	1350

国际合金代号	相当/相似AA合金
西班牙(Una Norma Espanol)	
L-313	2014
L-314	2024
L-315	2218
L-371	7075
瑞士机械工业协会(Verein Schweizerischer Maschinenindustrieller)	
Al-Mg-Si	6101
Al1.5Mg	5050
Al-Cu-Ni	2218
Al3.5Cu0.5Mg	2017
Al4Cu1.2Mg	2027
Al-Zn-Mg-Cu	7075
Al-Zn-Mg-Cu-pl	Alclad7075

注：本表仅包含主要在成分上与AA合金相当的合金，而对应者的成分极限值并不一定完全一致。

第4节 铝合金的金属物理学

铝合金的金属物理学的主要内容包括成分、机械加工和/或热处理对力学和物理性能的影响。以性能而言，强度的提高是铝合金开发中的主要目标，因为纯铝的低强度限制了它在工业上的应用。以下是两个增加铝合金强度最普通的方法。

- 使第二相组分或元素在固溶体和冷变形加工的合金里进行扩散(非热处理合金)。
- 将合金元素溶入固溶体，并使它们作为共格的亚显微颗粒析出(可热处理或析出硬化的合金)。

本节的前半部分将阐述影响强化机制的因素；后半部分将讨论相图的利用，以便更深刻地理解固态下热处理的作用。

合金化和强化机制

合金化的主要目的是为了提高强度、硬度，以及耐磨损、抗蠕变、抗应力松弛或抗疲劳的能力。不同的合金元素及其组合会对性能产生各种独特的影响，而这些影响与其合金相图密切相关，还牵涉到因凝固、热形变经历、热处理和/或冷变形加工而形成的显微组织和亚结构。

退火状态(最软)超纯铝的拉伸屈服强度约为10MPa(1.5ksi)，而某些经热处理的工业用高强度合金的可超过550MPa(80ksi)。考虑到它们之间的差异幅度(提高5000%以上)，这种实用且显著的作用仅对铝金属物理学的一个方面的贡献就已经令人瞩目。利用合金技术，拉伸屈服强度达690MPa(100ksi)甚至更高的强度也不难实现，但是这种合金的断裂韧度还无法满足像飞机或其他关键结构件用途上的要求。

工业用合金化为提高强度——尤其当伴之以通过冷变形加工的应变硬化、热处理或两者兼有时，最常用的元素为铜、镁、锰、硅和锌(见图3.1-1)。这些元素在铝中都有相当的固溶度，在所有的情况里，其固溶度均随温度的升高而增加(见图3.1-2)。

形成固溶体的这些元素在固溶体里的强化作用随着固溶体中的基体(Al)和溶质(合金元素)两者原子半径差的增大而趋于增强。由表3.1-14所示的退火状态的超纯二元固溶合金得到的数据上看，这种作用是非常明显的，但是所具有的其他一些作用也很明显，其中主要的是电子键合作用。固溶体里多溶质形成的作用比它们相累加的作用似乎要小一些，并且当一种溶质原子比铝原子大而另一种溶质原子比铝原子小时，上述作用与当两者都较大或都较小时的作用近

似相等。固溶体里的锰原子具有强化二元合金的高效性，但它对提高工业用铝强度的效果并不大，因为经过工业轧制的工序后，锰会在这些成分中大量地析出。

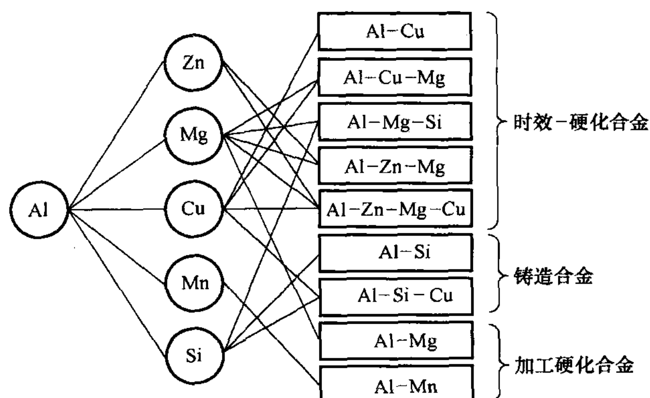


图 3.1-1　主要铝合金

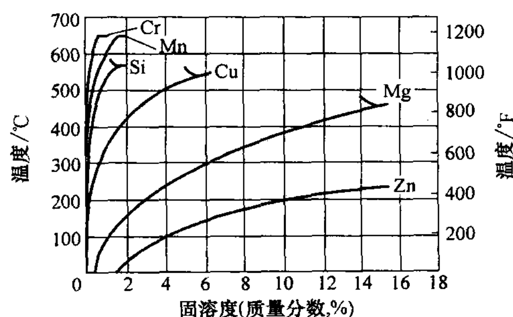


图 3.1-2　铝中最常用合金元素的二元平衡固溶性

表 3.1-14　超纯度铝中主要溶质元素的固溶度对强度的影响

元素	原子半径差①(r_x-r_{Al},%)	强度/元素含量值②							
		屈服强度③				抗拉强度④			
		MPa (at. %)	ksi (at. %)	MPa (wt%)	ksi (wt%)	MPa (at. %)	ksi (at. %)	MPa (wt%)	ksi (wt%)
Si	-3.8	9.3	1.35	9.2	1.33	40.0	5.8	39.6	5.75
Zn	-6.0	6.6	0.95	2.9	0.42	20.7	3.0	15.2	2.2
Cu	-10.7	16.2	2.35	13.8	2.0	88.3	12.8	43.1	6.25
Mn	-11.3	⑤	⑤	30.3	4.4	⑤	⑤	53.8	7.8
Mg	+11.8	17.2	2.5	18.6	2.7	51.0	7.4	50.3	7.3

①以原子半径百分比差递增的顺序而列。　②某些性能和含量的关系并不是线性的。一般，较小元素含量的单位效果比较大。　③每1%的合金元素含量(相对原子质量或重量)的屈服强度增量。　④每1%的合金元素含量(相对原子质量或重量)的抗拉强度增量。　⑤1at.%的锰是不可溶的(at.,按原子量;wt,质量分数——译者注)。

用固溶体里的合金元素强化的一些主要合金(常结合冷变形加工)均属于铝-镁系列的合金，w(Mg)的范围为0.5%~6%。这些合金里往往还含有少量的过渡元素(如铬或锰)，有时也含有锆用于控制晶粒和亚晶粒组织，还有常以金属间化合物相颗粒的形式存在的铁、硅杂质。图3.1-3所示为大多数普通铝-镁工业用合金的固溶体中的镁对屈服强度和拉伸塑性的影响。

主要以相对较低固溶度形成第二相组分的元素及其组合包括铁、镍、钛、锰和铬及它们的组合。这些元素形成的金属间化合物相，以及在凝固过程中或后凝固加热过程中通过固态析出而形成的单质硅组分的体积分数的不断提高，也能增强其强度和硬度。合金元素含量在单位重量中的增加速率常近似于但通常还是低于导致固溶体形成的速度。即使组分的颗粒是只有光学显微镜才易于分辨的大小，也会产生这种“第二相”硬化。这些不规则形状的颗粒是在凝固过程中形成的，而且大都沿着晶界生成于晶枝之间。

以形成第二相组分为主的元素是锰和铬，因为它们在工业合金里有非常低的平衡固溶度。这是因为在含有锰的多种成分中，还会有铁和硅的存在并形成$Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$的四元相；或含有铜形成$Al_{20}Cu_2Mn_3$的三元相。在大多数有铬存在的合金里还含有镁，因此在固态加热的过程中它们会形成$Al_{12}Mg_2Cr$，它也有非常低的平衡固溶度。在经快速凝固并从熔融态冷却到浇铸态的铝锭中，固溶体所保持的锰和/或铬的浓度会大大超过平衡固溶度，故其固溶体是过饱和并处于亚稳态的。通过预热制造含有这些元素的工业用锻压合金的铝锭，就是为了使含有这些元素中的某一种或其他种的、并与合金成分相适应的元素的复合相

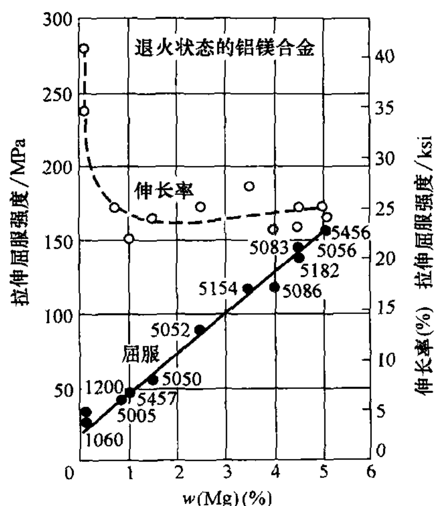


图 3.1-3　某些工业用铝合金的拉伸屈服强度、伸长率与镁含量之间的关系

产生固态析出。这种析出既没有形成明显的硬化，也不是其本意所在。其目的就是为了最终产生分离、扩散的颗粒，用于延缓或阻止合金在后续加热过程中的再结晶和晶粒生长。$Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$、$Al_{20}Cu_2Mn_3$或$Al_{12}Mg_2Cr$的析出物颗粒都是与基体不共格的，在其颗粒析出的同时，原始固溶体变得比较稀。这些条件不会导致合适的析出硬化。可以将电导率的改变用于衡量在预热时发生这种析出反应的完成程度。

在由固溶体与第二相组分和/或析出物分散体所构成的合金中，所有这些显微组织的组分基本上都是以累加的方式促使强度提高，如图 3.1-4 所示。

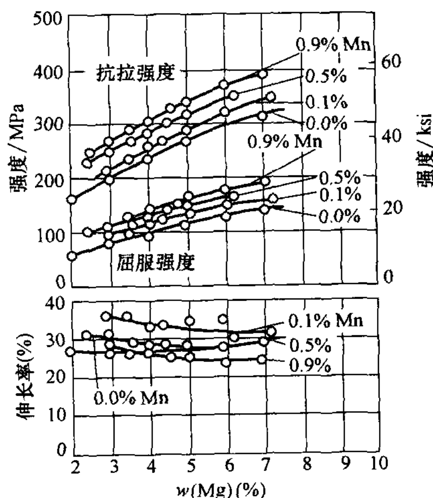


图 3.1-4　退火状态(O 状态)的 Al-Mg-Mn 合金 13mm 板材的拉伸性能

非热处理合金

按照定义归类，非热处理的工业用合金指的是热处理无法使其适当强化的一组合金——即表现不出有效的析出硬化。迄今所讨论的强化机制(固溶体的形成、第二相的显微组织组分以及析出物分散体)都能为非热处理合金提供所依据的机制。这种类型的锻压合金主要为含有镁、锰和/或铬的 3*xxx* 组和 5*xxx* 组的合金，以及 1*xxx* 铝组和 4*xxx* 组中只含有硅的某些合金。非热处理铸造合金就是分别含有硅和镁的 4*xx.x* 和 5*xx.x* 组合金，以及 1*xx.x* 铝的组别。

应变硬化。通过冷轧、拉拔或延伸进行的应变硬化是一种提高非热处理合金强度的高度有效的方法。非热处理工业用合金的几种典型的变形加工或应变硬化曲线(见图 3.1-5)表明，初始退火状态，薄板的强度随其冷轧压缩量的增加而提高。这种强度提高是以在拉伸试验中牺牲其表征为伸长率的塑性和在弯曲和拉拔的一些工序里降低其成形性为代价才取得的。在要求进行弯曲、成形或拉拔的用途中，使用一些部分退火(H2*x*)和稳定化(H3*x*)状态的材料常是有益的，因为具有这种状态的材料比具有相同强度但只进行应变硬化(H1*x*)的材料具有更大的成形能力(表 3.1-15)。

图 3.1-5　Al(1100)、Al-Mn(3003)合金和 Al-Mg(5050 和 5052)合金的应变硬化曲线

所有的轧制产品都能以应变硬化的状态供货，虽然根据它们所应用的产品如模锻件和自由锻件而经受的应变量各有所限制。对于特定的用途甚至铝铸件都能通过冷压进行强化。

表 3.1-15 用拉伸性能数据所表示的非热处理合金在 H1x 和 H2x 状态下的强度和塑性之间的一般性关系

合金及其状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi	
3105-H14	172	25	152	22	5
3105-H25	179	26	159	23	8
3105-H16	193	28	172	25	4

可热处理合金和析出硬化

按照定义，可热处理合金就是能够通过适当的热处理进行强化的合金，包括用于锻压产品以及用于生产铸件的各种合金材料。如图 3.1-1(原书错误,应为图 3.1-2。——译者注。)所示的各种溶质的固溶度都随温度的升高而增加，这种依赖于温度的固溶度是作为这类合金的先决条件。然而，光有这种性质还不能使合金具有析出硬化(或热处理)的能力。不论其溶质是完全溶于固溶体里、部分析出还是完全析出，大多数含有 Mg、Si、Zn、Cr 或 Mn 的二元合金都不会因热处理而发生改变。

相对照的是，含有 3% Cu 或以上的二元 Al-Cu 系统能够在固溶热处理和淬火之后，具有自然时效(即在环境温度里随时间而时效)的功效。随着自然时效时间的延长和合金的铜含量从大约 3% 增加到固溶度的极限值(5.65%)，强度和硬度提高的幅度也会变得更大。图 3.1-6 所示是含 1%～4.5% Cu 的高纯度 Al-Cu 合金经缓慢淬火后的自然时效曲线。通过将合金保持在适度高的温度里(对所有各种合金都适用的范围约为 120～230℃或 250～450℉)，使强度和硬度提高的速度和提高的幅度得以增加。这种处理称为析出热处理或人工时效。在 Al-Cu 系统里，少到只有 1% Cu 的合金经二次缓慢淬火后在 150℃或 300℉温度里保持 20 天后才开始硬化(见图 3.1-7)。含量低于接近 3% Cu 的这种合金系统经过几乎不会产生应力的缓慢冷却淬火后，就几乎没有自然时效的效果。

不同合金系在要求的加热温度与其固溶度之间所存在的关系反映其是否有析出硬化，而区分合金系的这种关系的特征决定了形成析出组织的类型。析出硬化是通过由析出反应所引起的一系列亚显微组织的改变而形成的，而强度的变化就是因这种析出反应所致，只有借助 X 射线衍射和透射电子显微镜才能对其进行揭示和分析。室温时效硬化(自然时效)是一种纪尼埃普斯顿区(Guinier-Preston,即 G-P 区)组织自发生成的结果。溶质原子根据其合金系统成团聚或偏聚地处于所选择的原子晶格平面上，并形成 G-P 区组织，这种组织具有更大的阻止位错运动的能力，因而被强化。

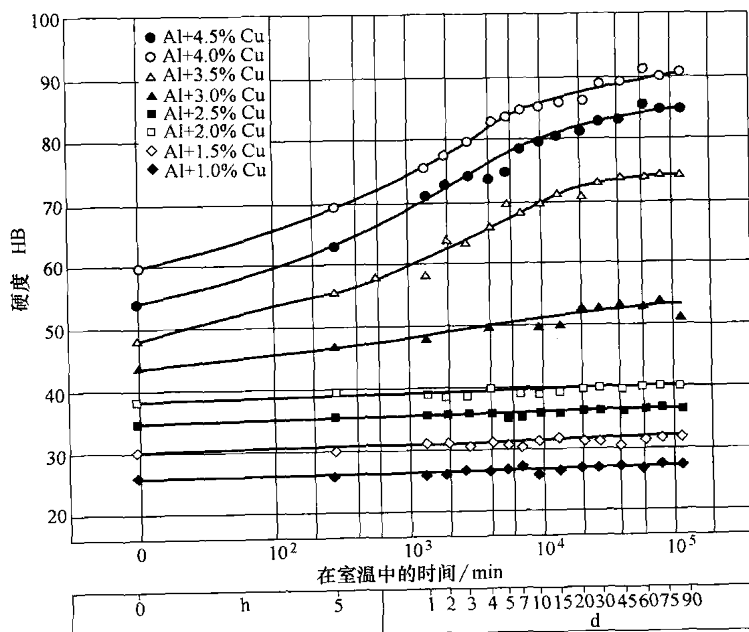


图 3.1-6 Al-Cu 二元合金在 100℃(212℉)的水中淬火后的自然时效曲线

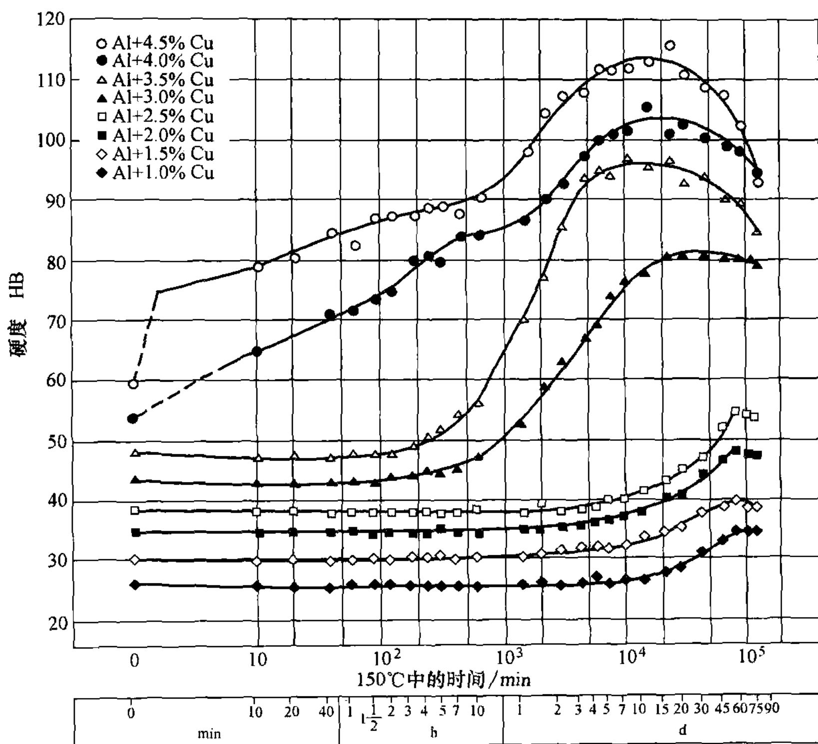


图 3.1-7 Al-Cu 二元合金在100℃(212℉)的水中淬火和在150℃(300℉)后的析出硬化曲线

图3.1-8示出了三种具有不同合金系统的工业用锻压可热处理合金在室温下，其拉伸屈服强度随时间而变化的曲线(自然时效曲线)。这三种合金的性能变化幅度很不相同，而且其不同的随时间变化速度实际上也很重要。因为7075及其类似的合金在这些条件下绝不会变得完全稳定，故它们很少以自然时效状态被使用。另一方面，2024却能以此状态得到广泛的应用。

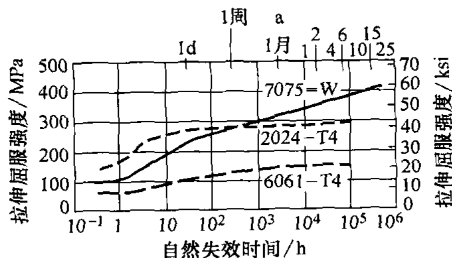


图 3.1-8 三种锻造铝合金经固溶热处理的自然时效曲线

这种特定合金系统通过高温下的析出热处理(或人工时效)生成过渡的、亚稳定形式的平衡析出物。这些过渡析出物是与固溶基体相共格的。用于确定析出物相是否为粘附性的特征就是一种在基体和析出物两者之间的匹配紧密性或原子栅格间距的错配度。析出物颗粒的存在，尤其是在大部分情况下基体内围绕着共格析出颗粒的应变场会阻止和延缓位错的移动，由此增加变形的阻力——换言之，即较高的强度。在最高强度阶段，尤其当要考虑应变场的因素时，这种析出颗粒极其细微，只有用透射电子显微镜(TEM)才能分辨，并构成相对较大的体积份额。

进一步加热至引起强化的温度或在更高温度下，析出物颗粒也随之生长，但更重要的是转变为平衡相，它们一般没有共格性。这些变化会使材料软化，并继续下去，形成最软的或退火的状态。在此阶段虽然经腐蚀的效果还易于观察——特别是在含有铜的合金里，但析出物颗粒也还是太小，连光学显微镜都无法分辨。

图3.1-9所示是Al-Mg-Si锻压合金6061的析出热处理或人工时效曲线。这是一组典型的表示拉伸屈服强度变化的曲线，其屈服强度的变化是在一系列温度中的每一档上随其时间增加而发生的。在所有的这些情况里，材料都要经固溶热处理，接着就在析出热处理开始之前进行淬火。有关热处理的工序、参数和操作的详细内容可参阅本手册(下册)第4篇第7章。

以上关于析出工艺及其对强度和金相组织的影响的叙述不仅适用于可热处理的二元成分的合金，还能

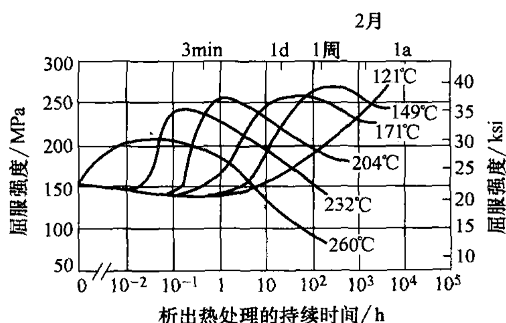


图3.1-9　固溶热处理的铝合金的析出热处理或人工时效曲线

应用于工业用合金；前者均非工业上所用，而后者有着复杂得多的成分。如前所述，不仅其力学性能会因这些热处理和自然时效的不同而变化，而且其物理性质（密度、电导率和热导率）和电化学性质（溶体电位）也要因之而变。以显微组织和亚显微组织的尺度看，电化学性质形成逐点的不均匀性，由此引起耐腐蚀性的变化。

检测物理性质和电化学性质变化对于全面阐述析出反应有着重要的作用，而且对于分析和判断可热处理的产品是否已进行了适当的热处理也是非常有用的。它们虽可以表明产品所达到的强度，却不能赖以确定是否满足规定的力学性能极限值。因为固溶体里的元素对电导率的劣化比同样元素与其他元素结合成金属间化合物的劣化更大，热处理可适用于制造导电体产品的各种铸锭。这些热处理就是为了尽可能多地将溶解杂质析出。铁是其中的主要元素，而且尽管其析出的量才万分之几，但是对用这种铸锭制成的电线、电缆或其他产品，电导率的影响却有相当现实的重要性。就力学性能而言，这些合金可以是、也可以不是可热处理的。导电体合金6101和6202是可热处理的。在这些合金使用状态中，强化析出物作为Mg_2Si的过渡形式被大量地从固溶体里析出，从而使其强度和电导率得以优化。

就析出所含溶质促使合金强化而言，工业用的可热处理合金几乎别无例外，都是以三元或四元为其基本系统。最重要的系统为：Al-Cu-Mg、Al-Cu-Si和Al-Cu-Mg-Si，它们属于2*xxx*和2*xx.x*的组（分别为锻压和铸造）里；Al-Mg-Si（6*xxx*锻压合金）；Al-Si-Mg、Al-Si-Cu和Al-Si-Mg-Cu（3*xx.x*铸造合金）；Al-Zn-Mg和Al-Zn-Mg-Cu（7*xxx*锻压和7*xx.x*铸造合金）；Al-Li-Cu-Mg（8*xxx*锻压合金）。上述各种情况里，多溶质元素的固溶度都随温度的降低而减小，如同《ASM手册》第3卷合金相图中介绍的固溶相线图所示。这些图都表示在特定系统里析出的（一种或多种的）平衡相。它们并不表明是否产生过渡相，也无从表示其成分。

应用于工业用合金的溶质元素和补充元素的这两种主要多合金添加都具有严格功能性，并且经过不同的热处理被使用，以此提供不同的性能组合——物理的、力学的和电化学的，以满足不同的应用要求。某些合金，特别是在铸件的铸造生产中，其硅含量远远超出仅为其可溶性或增强强度所需要的。此时，其主要作用是改善铸件的完善性和防止开裂，但过量的硅就像由锰、镍和铁所构成的显微组织组分一样，还能提高其耐磨性。用这样的合金制造的零件一般应用于汽油和柴油发动机上（活塞、缸体等）。

含有元素银和锂的合金经热处理也能具有高强度，含有锂还可以提高弹性模量和降低密度，这是应用上的很大优势，尤其是在航空航天方面。含有这些元素的合金在工业上的应用由于成本或在生产制造上遇到的困难，而会受到制约。

合金若含有铜作为其主要合金成分但又不含有镁时，加入少量的锡、镉或铟，或其组合，就能使合金通过析出得到很大的强化。具有这些功效的合金已能投入工业化生产，但是因为其昂贵的特殊工艺和提炼中的局限性，其生产的批量都不大。以镉为例，需要使用特殊装置来防止在合金化过程中因镉蒸气的产生和散发对人体健康所造成的伤害。

主要需通过固溶体和第二相硬化提高其高温强度，因为至少要达到或超过析出硬化的温度范围（≥230℃或450℉）时，析出反应才能继续进入软化区。在超音速飞机和宇宙飞船上应用时，合金要承受空气动力学的加热。2*xxx*组的可热处理合金可以用于高达约150℃（300℉）的温度里。经时效的快速凝固粉末冶金合金（Al-Fe-V-Si合金）能在高达315℃（600℉）的温度下保持其适用的强度。

强化对其他力学性能的影响。耐疲劳性（从动力应力的应用到进入拉伸范围）一般都是随强度的增加而得到提高的，而不管强度的增加是源自于合金元素本身的效果、应变硬化还是热处理。一般来说，依据起始开裂的时间或导致失效的载荷循环，这种疲劳强度的提高低于静态强度的提高。对于一种既定的合金，其最高耐疲劳性有时是由其状态所决定的，而这种状态所具有的静态强度低于其可能有的最高强度——例如2024-T3*x*或2024-T4*x*相对于2024-T6*x*或2024-T8*x*。这种情况的发生主要是由于在高应力强度因数下的抗疲劳裂纹生长要求有好的断裂韧度，而这种性能一般随其强度的增强而降低。

相对于以耐变形能力定义的强度提高，其塑性、

可锻性、易成形性和断裂韧度都趋向于降低。然而，这些性能与强度之间的逆向关系并不具有普遍性。如同前面已表明的作为非热处理合金，H2*x* 或 H3*x* 状态在塑性、强度方面优于 H1*x* 系列。事实上，在断裂韧度与屈服强度间的关系上，7*xxx* 组合金（Al-Zn-Mg-Cu 类型）优于 2*xxx* 和 6*xxx* 组合金。

当合金应用于关键的工程结构，如飞机以及如货车车轮和其他汽车和货车的零件产品上的时候，所有这些性质都必须予以仔细考虑。可以避免发生应力集中和导致任何局部腐蚀的好的结构设计，在大部分情况下其重要性至少不亚于对于好的合金和状态的选择。

涉及合金开发的其他考虑。直接影响最终产品的功能特性的工程性能和特征仅仅是在合金开发中必须考虑的一系列问题中的一部分。首先需要考虑的问题之一就是作为经济上可行的合金必须能被铸造或制造成所要求的形状，同时应当消除一些由裂纹或其他工艺损伤所造成的不必要废品损耗。包括批量极大的如饮料罐和纯铝包覆（Alclad）的产品以及钎焊复合材料在内的许多合金和特种产品，都是为了适应非常特殊的用途，还要将成本-效用原理应用于它们的工业可行性分析。所有这些产品还必须在市场上与其他金属材料以及聚合物材料、玻璃和陶瓷竞争其一席之地。

铝合金相图的应用

虽然几乎没有什么产品是以它们的相平衡状态出售和使用的，但平衡相图还是研究成分以及凝固与固态的热处理对显微组织影响的基本工具。对于铝合金，相图用于确定凝固和熔化的温度、凝固线路，以及平衡相的形成及其溶解的温度。除了决定适当的铸造和热处理的温度以外，相图还用于某些元素的辅助元素的最高添加量，以此防止粗大初生颗粒的结晶。铝合金从液体到固体的最重要转变就是共晶和包晶。说明共晶和包晶反应的相图例子将在后面的段落里进行讨论，铝合金相图还可参阅本手册中“金属的结构和性质”一章和《ASM 手册》第3卷。

可以用铝-铜系统（见图 3.1-10）来说明共晶反应。当在凝固的过程中达到富铝合金的液相线温度时，液体开始凝固出铜在铝（α-铝）中的固溶体。当温度接近固相线时，α-铝变得更加富铜。在含量低于最大固溶度，即 w(Cu) 为 5.7%，当温度下降到固相线温度以下时，凝固就完成了。在低于溶解度线的温度里，Al_2Cu 颗粒会从中析出，使 α-铝中的铜减少。当在接近平衡的条件下冷却到室温时，α-铝不再含有铜，故其强度也很低。如同本节前面所述，为提高强度，材料必须进行固溶热处理、淬火和时

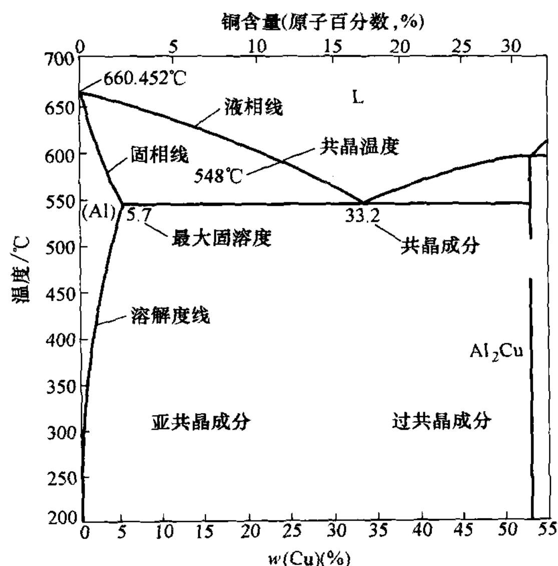


图 3.1-10　表示共晶反应的铝-铜相图

效，以此生成亚稳态的析出物。在 w(Cu) 超过 5.7% 的合金里，当达到共晶温度时，还有一些液体存在。这些液体在此温度下通过共晶反应凝固成为 α-铝和 Al_2Cu 金属间化合物颗粒。当冷却到共晶温度以下时，铜以 Al_2Cu 相从 α-铝中析出。在工业铸造条件下，在含量低于最高固溶度的合金中也会发生共晶反应，了解这一点是很重要的，尽管平衡相图并不能对此进行预测。因为 Al_2Cu 颗粒是在大多数的铝铸锭和成形铸件的凝固过程中形成的，所以经过“预热”和均质化可将金属间化合物颗粒溶解。

铝合金中的包晶反应是以铝-铬系统为代表的（见图 3.1-11）。包晶成分的质量分数高于 0.41% 又

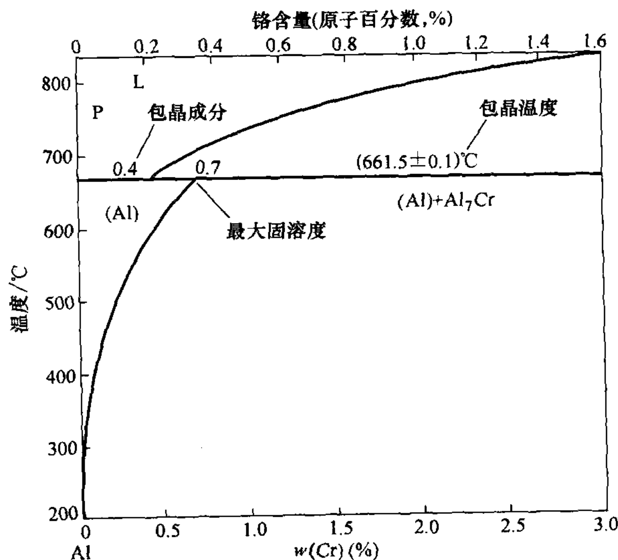


图 3.1-11　表示包晶反应铝-铬相图

低于最大固溶度 0.77% 的合金，在其平衡凝固的过程中，当温度达到液相线时会形成一种金属间化合物 Al_7Cr。当温度下降到包晶温度 661℃（1222 ℉）时，剩下的液体和 Al_7Cr 一起转变为 α-铝。然而，在工业凝固条件下，初生的 Al_7Cr 颗粒没有机会转变为 α-铝而遗留下来。因而确立最高含铬量极限值，以使所有的铬都留在铸锭的过饱和固溶体里。在铸锭预热中，它作为含铬弥散颗粒而析出。

合金化对相形成的影响

所有的工业用铝合金都含有铁和硅以及两种或更多种特意加入的元素用于增强其性能。下面将介绍所形成的相和合金化元素的功能。图 3.1-1 总结了在铝合金中添加的大多数常用合金元素。

铁。事实上所有的铝合金都含有一些铁，它是在提炼铝土矿和熔化之后作为杂质留下来的。相图预示在含有质量分数为千分之几的铁的铝铁合金的凝固过程中，大部分铁都在液相中，直到固溶共晶体加上具有单斜晶体结构的 Al_3Fe 金属间化合物组分颗粒发生凝固。依据凝固速度和所含有的其他元素如锰，亚稳态的正交晶体的 Al_6Fe 相的组分颗粒取代平衡 Al_3Fe 而得以形成。铁在铝中的最大固溶度为 0.05%，但这个固溶度在大部分的结构合金中是很低的。

硅。这也是一种在工业铝合金中普遍存在的杂质元素。通过共晶反应形成两种三元相，即立方 $\alpha Al_{12}Fe_3Si$ 和单斜晶的 $\beta Al_9Fe_2Si_2$。在含硅量低的情况下，几乎所有的铁都是以 Al_3Fe 而存在。随着硅含量的增加，先是 α-Al-Fe-Si 然后才是 β-Al-Fe-Si 相的出现。作为工业产品的相，不一定是平衡相图能预测到的相，因为要长时间地处于所要求的高温中才能接近平衡。大含量的硅能改善铸造性和流动性。因此，它应用于 *4xxx* 的钎焊薄板和 *3xx.x* 和 *4xx.x* 的铸造合金。铸造合金里的硅的质量分数大约为 5%～20%。过共晶合金（$w(Si) > 12.6\%$）用于发动机缸体，因为其初始硅颗粒具有耐磨性。有些 *3xx.x* 铸造合金里含有少量镁，便可使其时效硬化。

在某些含有镁的合金里额外加入硅可以实现其析出硬化。Al-Mg-Si 系统是 *6xxx* 合金的基础。在低含镁量的情况下，元素硅可以作为第二相颗粒而存在。随含镁量的增加，硅颗粒和平衡六方晶系的 Mg_2Si 的两种组分都会存在。在较高含镁量的情况下，仅有 Mg_2Si 存在。正是由于处于亚稳态的 Mg_2Si 早期生成物的析出而使三元合金得到强化。铜的加入会形成一种复杂的 $Al_4CuMg_5Si_4$ 四元相，这种四元相的早期生成物使 Al-Cu-Mg-Si 合金得到强化。

锰。铝-锰系统是最早的铝合金的基础。如为人们所熟悉的 *3xxx*，这种合金由于其极佳的变形性和耐腐蚀性，已成为应用最为广泛的锻压合金。工业铝-锰合金还含有铁和硅。在工业用尺寸的铸锭凝固的过程中，一些锰通过共晶反应生成 $Al_6(Mn,Fe)$ 和立方 $Al_{12}(Fe,Mn)Si$。而其余的锰保留在固溶体里，并且在铸锭预热过程中作为 $Al_{12}(Fe,Mn)Si$ 和为 $Al_6(Mn,Fe)$ 的弥散颗粒析出。这些弥散颗粒能强化材料和控制再结晶的晶粒大小。在含有铜的合金里，锰以 $Al_{20}Cu_2Mn_3$ 的弥散颗粒析出。弥散颗粒对强度的影响微小，但有助于经固溶热处理后的晶粒大小控制。

镁。铝-镁系统是构成锻压 *5xxx* 和铸造 *5xx.x* 非热处理型铝合金的基础，它们通过固溶强化和加工硬化提供强度与耐腐蚀性的极佳结合。虽然相图在理论上展示的是一条正斜率的溶解度线，这也是析出硬化系统的必要条件，但是面心立方（fcc）Al_3Mg_2 析出物的成核困难使得可热处理的铝-镁合金不可能商品化，除非含有足量的硅、铜或锌，用于生成 Mg_2Si、Al-Cu-Mg 和 Al-Zn-Mg 的析出物。

铜。铝-铜系统是锻压 *2xxx* 和铸造 *2xx.x* 合金的基础，并且许多其他可热处理的合金都含有铜。在工业铝-铜合金里，一些铜能在其凝固过程中与铝或铁化学结合成四方 Al_7Cu_2Fe 或正交 α（Al，Cu，Fe）的组分颗粒。这些组分虽然无法在后续的热处理中溶解，却能在铸锭或铸件热处理过程中由一种转变为另一种。在含有微量镁的铝-铜合金热处理过程中，Al_2Cu 作为强化相而析出。

将镁加入富铝的铝-铜合金里，能通过共晶分解促使 Al_2CuMg 相的形成。而生成面心正交 Al_2CuMg 析出物的亚稳态先析出颗粒被用于强化多种在航空航天工业里得到应用的结构合金，因为它们能赋予一种满足强度、断裂韧度和耐疲劳裂纹生长所要求的综合能力。

锌。这种元素几乎不会使铝获得固溶强化或加工硬化的作用，但是 Al-Zn-Mg 析出物却是 *7xxx* 锻压合金和 *7xx.x* 铸造合金的基础。在工业 Al-Zn-Mg 合金中，能通过共晶分解形成两种相：六方晶系 $MgZn_2$ 和体心立方（bcc）$Al_2Mg_3Zn_3$。根据锌/镁比例，无铜合金可以通过生成 $MgZn_2$ 或 $Al_2Mg_3Zn_3$ 的亚稳态先析出颗粒进行强化。在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中，铜和铝代替 $MgZn_2$ 中的锌形成 $Mg(Zn,Cu,Al)_2$，还能通过共晶分解和固溶析出在这些合金中形成 Al_2CuMg 颗粒。

铬。在工业合金中，当它的固溶度降低到某一程度时，因低于二元铝-铬相图所示铬含量而发生的包晶反应会生成 Al_7Cr 的初生相颗粒。由于粗大初生颗

粒对塑性、疲劳强度和断裂韧度都是有害的，所以铬的上限取决于其他合金和杂质元素的含量和性质。在5*xxx*合金中，fcc立方$Al_{18}Mg_3Cr_2$的弥散颗粒就会在铸锭的预热过程中析出。在7*xxx*合金中，其弥散颗粒成分接近于$Al_{12}Mg_2Cr$。铬的弥散颗粒对非热处理合金的强度以及对可热处理合金产品的晶粒大小控制和再结晶的程度都有益处。

锆。这种元素也与铝形成包晶。由相图可预测，平衡Al_3Zr相是一种四元相，而亚稳态的立方Al_3Zr的细微弥散颗粒是在铸锭预热处理过程中形成的。从20世纪60年代以来，所开发的大部分7*xxx*和部分6*xxx*、5*xxx*合金都含有少量的锆，通常低于0.15%，形成用于控制再结晶的Al_3Zr弥散颗粒。

锂。这是一种减小铝合金的密度并提高其模量的元素。在二元合金中，它形成亚稳态的Al_3Li析出物，并且在Al-Cu-Li合金中与铝和铜结合在一起形成大量的Al-Cu-Li相。由于它相对其他元素的高昂成本，锂合金仅在空间和军事用途上会具有其成本效用。

精选参考资料：

- *Aluminum*, Vol 1-3, K.R. Van Horn, Ed., American Society for Metals, 1967.
- *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, J.E. Hatch, Ed., American Society for Metals, 1984.
- L.F. Mondolfo, *Aluminum Alloys: Structure and Properties*, Butterworths, 1976.

第5节 铝的锻压产品

工业铝的锻压产品可以分为两类。标准化锻压产品包括薄板、厚板、箔材、圆棒、棒材、线材、管材和结构型材。工程锻压产品就是为特定用途而设计的产品，包括挤压型材、锻件和冲压件。锻压产品的典型例子包括厚板或薄板，它们再被成形或加工制造成为如用于飞机或建筑的构件、家用铝箔材和挤制型材如窗户的框架。

用于锻压产品的合金

铝合金通常都是按照本章“铝的合金和状态代号系统”一节所述的合金代号系列进行分组。合金分组的一般特征如下所述：

1*xxx* 系列。纯度为99.00%或更高的铝有许多用途，尤其在电工和化学方面。这种牌号铝的特征是优异的耐腐蚀性、高热导率和高电导率、低力学性能以及极佳的变形加工性。借助于应变硬化，强度可以有适度的提高。铁和硅是其主要杂质。

2*xxx* 系列。铜是这种系列合金的主要合金元素，常常还含有镁作为第二添加元素。这种合金需要固溶热处理，以此获得最佳性能，在其固溶热处理的状态下，力学性能类似于并有时超过低碳钢的性能。在某些情况里，通过析出热处理(时效)进一步提高其力学性能。这种处理能提高屈服强度并伴之以伸长率的降低，但对提高抗拉强度的作用不太大。

2*xxx*系列合金的耐腐蚀性不如其他大部分铝合金，在一定的条件下它们会遭受晶界腐蚀。因此其薄板合金常要用高纯度铝、6*xxx*的镁-硅合金或含有1% Zn(质量分数)的合金进行包覆。其单面镀层厚度为总厚度的2.5%~5%，以此作为其心部材料的电镀保护层，故而大大提高了它的耐腐蚀性。

2*xxx*系列合金特别适宜于要求高的强度/重量比的零件和结构，通常用于制造汽车和飞机的轮子、汽车的悬挂系统零件、飞机的外壳和机翼的蒙皮、结构零件以及要求工作温度高达150℃(300℉)下具有较高强度的零件。

3*xxx* 系列。锰是3*xxx*系列合金的主要合金元素。这种合金一般都是非热处理的，但其强度要超过1*xxx*系列合金的20%。由于仅有有限的锰(大约1.5%)能有效地加入铝里，故锰只有在为数不多的合金里才可作为主要元素使用。然而其中常用的3003合金广泛用于具有中等强度又需良好变形加工性的一般用途。

4*xxx* 系列。4*xxx*系列合金的主要合金元素为硅，当将其加入到足够量(达12%)便可使其熔点降至相当低的范围里，而不会造成脆性。为此铝-硅合金可用于制作焊丝和作为连接铝材的钎料，这时它要求的熔点范围应比基体金属更低。这个系列里的大部分合金都是非热处理的，但当将其用于可焊接热处理合金时，它们会从后者中汲取某些合金组分，并可进行有限程度的热处理。当使用阳极氧化表面处理时可以使合金有合适的含硅量，并变成深灰到木炭色，以适合建筑上的用途。合金4032有低线膨胀系数和高耐磨性，因此它适合于生产锻造的发动机活塞。

5*xxx* 系列。5*xxx*系列合金的主要合金元素为镁。当它作为合金元素或者与锰一起使用时，能成为一种有从中到高的强度并可加工硬化的合金。作为一种硬化剂，镁的效果比锰大得多，质量分数约为0.8%的Mg相当于1.25%的Mn，而且还能以更高的量加入。该系列的合金还具有良好的焊接特性和海洋环境中的耐腐蚀性。然而，对于含镁量较高的合金(在超过65℃或150℉的温度里使用、质量分数高于3.5%的合金)，应该对允许的冷变形加工程度和安全使用温度实行一定的限制，以此防止其产生对应力腐蚀开裂的

敏感性。

6*xxx* 系列。在 6*xxx* 系列中的合金几乎以形成硅化镁(Mg_2Si)所要求的比例含有硅和镁，故使之成为可热处理的合金。虽然其强度不如 2*xxx* 和 7*xxx*，但是 6*xxx* 系列合金有很好的成形性、焊接性、切削性和耐腐蚀性，同时还具有中等的强度。这组可热处理的合金可以形成 T4 的状态(固溶热处理而不析出热处理)，并且可通过析出热处理形成完全的 T6 状态，即以此得到强化。

7*xxx* 系列。含量为 1%～8%(质量分数)的锌是 7*xxx* 系列合金中的主要合金元素，并且再伴随含有较小百分比的镁就能形成从中等到非常高强度的可热处理合金。通常还要加入少量的其他元素如铜和铬。加入微量的钪也能改善其性能。7*xxx* 系列合金应用于各种飞行框架结构、可移动设备以及其他承受高载的零件上。

较高强度的 7*xxx* 合金的耐应力腐蚀开裂的能力会有所降低，并且常以轻度过时效的状态使用，以便获得较好的强度、耐腐蚀性和断裂韧度的性能结合。

8*xxx* 系列。它具有很宽的化学成分范围。例如，借助粉末冶金工艺制造的弥散强化的 Al-Fe-Ce 合金(如 8019)或 Al-Fe-V-Si 合金(如 8009)，可改善它们的高温性能。其含锂合金(如 8090)能获得较低的密度和较高的刚性。后者可进行析出硬化，用于代替从中等强度到高强度的 2*xxx* 和 7*xxx* 合金，应用于某些航空航天的用途(如直升机的零件)。

锻压产品的一般特征

锻压产品就是通过塑性变形成形的产品。这种变形是借助热和冷变形加工工艺，如轧制、挤压、锻造和拉拔的单一或组合，将铸锭转变成所要求的产品形状。在变形过程中，金相组织也从铸造组织转变为完全的锻压组织。在此过程中，晶粒的大小和形状会发生根本的变化，其最后的形态取决于整个热力学的历程(包括任何最终退火阶段或热处理)。在变形的过程中，铸锭中以不规则形态存在的第二相显微组分被粉碎成为较为等轴形的颗粒，它们趋于按最大延伸方向进行排列成行。其晶粒通常也沿此方向延伸，并且在平轧产品、细挤制产品或模锻件的模塑平面区中变细或变扁。因此，压力加工的金相组织是有方向性的，其程度取决于产品成形过程中所发生变形的方向性。

这些金相组织的变化伴随着性能、特别是力学性能的变化，锻压产品的这种性能一般高于原始铸锭的性能。锻压产品一般会表现出力学性能的明显的方向性(即各向异性)，这种方向性对于用于制造它们的铸锭来说是可忽略不计的。薄板在拉伸性能上的方向性并不明显，但是在深拉或冲盂工序中，其性能却有十分显著的方向性。薄板在平面不同方向上性能的不一致性，会造成圆形冲盂上所谓“耳子”凸起的形成。这主要是由薄板的结晶织构即晶粒的非随机性或取向性所造成的(详见后面“结晶织构”中所讨论的)。在如制造饮料和食品听罐所采用的深拉或冲盂工序中，应使用特殊的“无耳子特性”薄板。

能够沿正交三个方向承受载荷或试验的较厚产品一般会在三个方向上分别展示不同的拉伸和压缩性能以及耐疲劳应力性和耐应力腐蚀开裂性。依据这种特征，纵向方向(如图 3.1-12 所示的产品在加工中被延长或扩展最多的方向)的性能一般最为突出。在宽度方向(如图 3.1-12 所示，可以为拉伸或压缩的方向，但

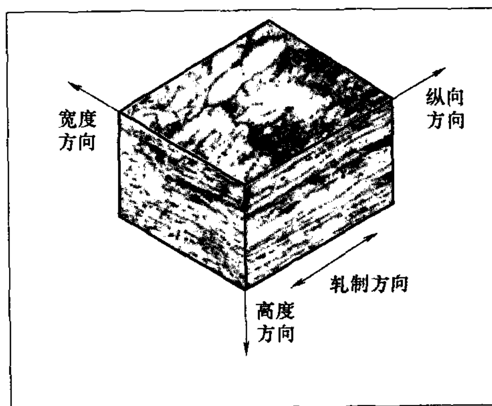


图 3.1-12　7075-T6 平轧件的显微组织示意图，显示其金相组织的方向性。40×

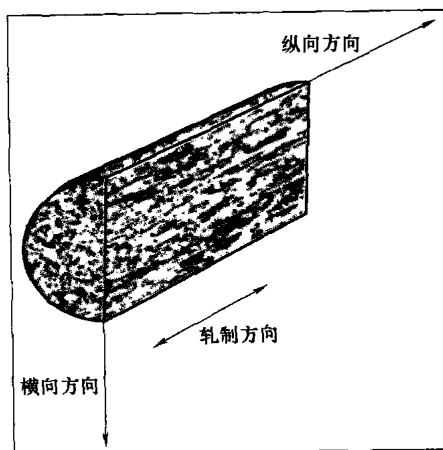


图 3.1-13　7075-T6 杆件的显微组织示意图，显示其金相组织的方向性。40×

无论拉伸还是压缩，都比另两个方向上的小)，其性能和耐疲劳应力性、耐应力腐蚀开裂性均居于另两个方向的中间。在厚度方向(如图3.1-12所示，加工中压缩最多的方向)，其性能和耐疲劳、耐应力腐蚀开裂性一般比另两个方向的都小。在大多数情况里，纵向方向、宽度方向和厚度方向分别对应于产品矩形横截面中的最长、中间和最短的三个尺度。对于轴对称横截面(圆形、方形和六边形等)的产品，不存在宽度和厚度方向的差异，在其横截面平面上的任何方向都可认为是横向的(见图3.1-13)。

方向性对力学性能的影响如图3.1-14所示。其性能的变化是由于厚度的变化、锻造压缩量变化以及试件的轴向方向与晶粒流动的方向之间夹角的变化所引起的。这两个模锻件都清楚地表明厚度方向的性能都明显低于纵向方向的性能。

从锻件上切下来的棒料的疲劳强度所受影响的方式与抗拉强度、屈服强度和伸长率是一样的。图3.1-15所示是从两个锻件样件上分别沿平行和横向于锻造的流线方向切割下来的两件试件的疲劳试验结果。也再次表明沿纵向的性能较高。

方向性还在很大程度上受其晶粒组织是再结晶还是非再结晶的影响，后者一般是方向性更强的条件(见后面“晶粒组织”的讨论)。在经热处理的挤压型材的情况里，通常有一层非常薄的、围绕在非再结晶核外面的再结晶化晶粒组织表面或外表层。由于再结晶晶粒材料的耐疲劳性比非再结晶组织的要低一些，故其厚度应该减小到最小程度。为此对于一些关键用途，应从挤压后端开始切除相当的百分比长度，因为挤压件从前端到后端，其再结晶层的厚度不断增加。在大多数的关键用途里，都是要求用切削或化学蚀铣的方法完成再结晶材料的去除。

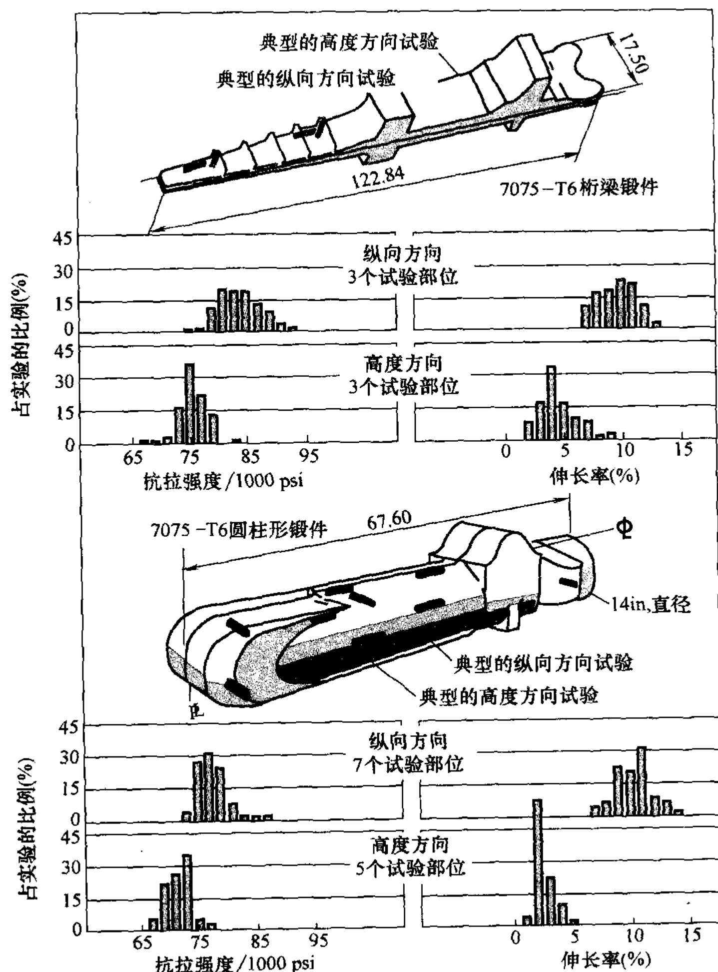


图3.1-14　两种不同的7075-T6铝合金锻件的不同力学性能。两种锻件都是在35000t的压力机上锻成的，在470℃(880℉)温度进行固溶处理3h，60℃(140℉)水淬，然后120℃(250℉)时效处理24h。桁梁锻件(上部图所示)：铸锭三个来源分为17批次。两批为480mm(19in)圆形料，15批为250~300mm(10~20in)方形料。28件锻件在所示的部位进行试验。圆柱形锻件(下部图所示)：所有的圆柱形锻件都是用480mm(19in)的圆形料锻造而成。其中6件在所示的部位进行试验

挤压件一般都有非再结晶的组织，它所表现的拉伸性能的方向性比横截面与之相当的、也经过非再结晶的轧制件的更高一些。两者的差别主要表现在挤压产品较高的纵向强度值上，可高于10%，这是由于挤压变形能产生更强的晶粒方位的取向性。

晶粒组织。铝合金的铸锭和铸件中的晶粒大小一般通过使用能形成含有钛和/或硼的金属间化合物的孕育剂而得到控制。晶粒组织是在变形的过程中得以改善的。当晶格位错形成亚晶粒网络时，大部分的铝合金产品都会在热变形加工过程中经受动态复原。在一遍遍的轧制之间和之后(静态再结晶)或者在轧制的变形过程之中(动态再结晶)会形成新的无位错晶粒。在其变形过程中，铝基体的晶格会在其组分和粗大析出颗粒之间的界面上旋转。这些高能晶格点阵起到成核再结晶的作用。这就是所谓颗粒激励成核的过程，并且是铝的再结晶过程中的一种重要机制。发挥晶核作用的颗

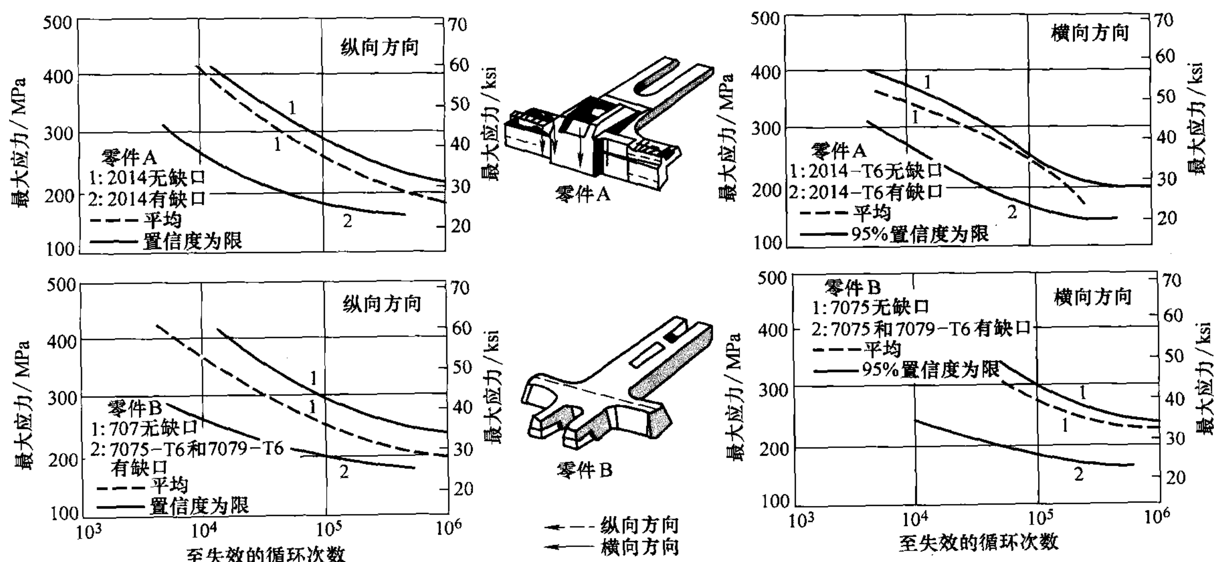


图3.1-15　合金、设计和方向性对铝合金锻件的轴向疲劳的影响。图示为适用于零件A和B的数据。薄板型试件，3.2mm(0.125in)厚、6.4mm(0.25in)宽，分别沿平行和横向于锻造流方向切制试件。试件从拉制件上所取的部位如图所示。应力中值为91.7MPa(13.3ksi)，缺口为位于试件中心的直径1.2mm(0.047in)的圆孔，$K_t=2.5$。

粒大小随温度的降低而减小，而应变和应变率则随之增加。弥散颗粒会阻碍高角度晶界的移动。因此，热变形加工组织阻止再结晶的进行，并常能在经延伸的铸造晶粒边界内维持经受动态复原的亚晶粒组织。在经热处理并含有足够量弥散颗粒的产品中，经热变形加工的厚板、锻件和挤压件的未经再结晶组织，在经过固溶热处理之后还能得以保留。

经过热变形加工产品的再结晶程度会对断裂韧度产生影响。非再结晶产品能比部分或全部再结晶的产品形成更高的韧性。这种情况是由于在淬火过程中在再结晶的高角度晶界上所发生的析出。这些析出颗粒会增加低能量沿晶界断裂的可能性。如薄板、圆棒和管材等经过冷轧的产品，都能在固溶热处理或退火成O状态的过程中持续不断地进行再结晶。

减小晶粒尺寸能使O状态的5*xxx*合金产品的强度提高7~28MPa(1~4ksi)，但是晶粒的大小并不是其他铝合金产品提高强度的主要因素。然而有几种成形性的度量方法受晶粒大小的影响，为此晶粒大小也必须予以控制。要采用一种特定的控制晶粒大小方法生产稳定的细晶粒，这是使铝合金薄板形成超塑性特性所必不可少的。

结晶织构。铝铸锭和成形铝铸件一般都具有随机的结晶织构，构成各个晶粒的单一晶胞的方位都是不一致的。然而由于变形会导致特定的结晶方位取向。许多晶粒经过旋转并趋于与变形方向相对应的特定方位。对于有着高宽厚比的扁轧产品和挤压件，其变形织构与纯fcc金属的相似。这些方位可以用晶粒中平行于被加工产品的平面{nnn}和平行于变形加工方向的方向{nnn}的米勒指数描述。占优势的织构有{110}[112]、{123}[634]和{112}[111]。在再结晶的过程中，会在{001}[100]或{011}[100]的方位上形成一种高比例的晶粒。或者，如果在很大程度上存在着颗粒激励成核，再结晶织构将是随机的。再结晶织构的控制对于要进行拉拔的非热处理薄板显得尤为重要。如果织构组织不是随机的，将会在拉拔过程中产生耳子。在圆棒或棒材的挤压或拉拔过程中，其织构是一种双纤维织构，里面几乎所有的晶粒都按照[001]或[111]的晶粒方向排列。在可热处理合金中，织构会对具有双纤维织构的挤压件的性能产生最为强劲的影响。经过这种工艺的强化，挤压件上展示上述纵向织构的屈服强度比其横向方向的要高出70MPa(10ksi)。如果通过再结晶使这种双纤维的织构消失，其纵向方向的强度将降低到与横向方向的一样。

产品型式

表3.1-16所示是普通锻压铝合金所适用的不同产品型式。同时列出了推荐的适用状态。有关状态代号的描述可参阅本章第2节。

表3.1-16　锻压产品及其状态

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
1050	—	—	—	H112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1060	O, H12, H14, H16, H18	O, H12, H14, H112	O, H12, H14, H18, H113	O, H112	—	—	—	H14	—	—	—	—	—	—
1100	O, H12, H14, H16, H18	O, H12, H14, H112	O, H12, H14, H16, H18, H113	O, H112	—	—	O, H112	O, H112, H14, F	O, H112, F	O, H112, H12, H14, H16, H18	O, H14	H112, F	O, H19	O, H14, H18, H19, H25, H111, H113, H211
1145	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	O, H19	O, H14, H19, H25, H111, H113, H211
1200	—	—	—	H112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1235	—	—	—	H112	—	—	—	—	—	—	—	—	O, H19	—
1345	—	—	—	—	—	—	—	—	—	O, H12, H14, H16, H18, H19	—	—	—	—
1350②	O, H12, H14, H16, H18	O, H12, H14, H112	—	H111	H111	H111	H111	O, H12, H14, H16, H22, H24, H26	H12, H111	O, H12, H14, H16, H19, H22, H24, H26	—	—	—	—
2011	—	—	T3, T4511, T8	—	—	—	—	T3, T4, T451, T8	T3, T4, T451, T8	T3, T8	—	—	—	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
2014	O，T3，T4，T6	O，T451，T651	O，T4，T6	O，T4，T4510，T4511，T6，T6510，T6511	—	—	O，T4，T4510，T4511，T6，T6510，T6511	O，T4，T451，T6，T651	O，T4，T451，T6，T651	O，T4，T6	—	F，T4，T6，T652	—	—
包铝（Alclad）2014	O，T3，T4，T6	O，T451，T651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2017	—	—	—	—	—	—	—	O，H13，T4，T451	O，T4，T451	O，H13，T4	T4	—	—	—
2018	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F，T61	—	—
2024	O，T3，T361，T4，T72，T81，T861	O，T35，T361，T851，T861	O、T3	O，T3，T3510，T3511，T81，T8510，T8511	—	—	O，T3，T3510，T3511，T81，T8510，T8511	O，H13，T351，T4，T6，T851	O，T351，T4，T6，T851	O，H13，T36，T4，T6	T4	—	—	—
包铝（Alclad）2024	O，T3，T361，T4，T81，T861	O，T351，T361，T851，T861	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）单面2024	O，T3，T361，T81，T861	O，T351，T361，T851，T861	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5%包铝（Alclad）2024	O，T3，T361，T81，T861	O，T351，T361，T851，T761	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5%包铝（Alclad）单面2024	O，T3，T361，T81，T861	O，T351，T361，T851，T861	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
2025	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F，T6	—	—
2036	T4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2117	—	—	—	—	—	—	—	O，H13，H15	—	O，H13，H15	T4	—	—	—
2124	—	T851	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2218	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F，T61，T72	—	—
2219	O，T31，T37，T81，T87	O，T351，T37，T851，T87	—	O，T31，T3510，T3511，T81，T8510，T8511	—	—	O，T31，T3510，T3511，T81，T8510，T8511	T851	T851	—	—	F，T6，T852	—	—
包铝（Alclad）2219	O，T31，T37，T81，T87	O，T351，T37，T851，T87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2618	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F，T61	—	—
3003	O，H12，H14，H16，H18	O，H12，H14，H112	O，H12，H14，H16，H18，H25，H113	O，H112	H18，H112	—	O，H112	O，H112，F，H14	O，H112，F	O，H112，H12，H14，H16，H18	O，H14	H112，F	O，H19	O，H14，H18，H19，H25，H111，H113，H211
包铝（Alclad）3003	O，H12，H14，H16，H18	O，H12，H14，H112	O，H14，H18，H25，H113	O，H112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3004	O，H32，H34，H36，H38	O，H32，H34，H112	O，H34，H36，H38	O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）3004	O，H32，H34，H36，H38	O，H32，H34，H112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
3005	O, H12, H14, H16, H18, H19, H26, H28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3105	O, H1, H14, H16, H18, H25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4032	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F, T6	—	—
5005	O, H12, H14, H16, H18, H32, H34, H36, H38	O, H12, H14, H32, H34, H112	—	—	—	—	—	O, H12, H14, H16, H22, H24, H26, H32	—	O, H19, H32	O, H32	—	—	—
5050	O, H32, H34, H36, H38	O, H112	O, H32, H34, H36, H38	—	—	—	—	O, F	O, F	O, H32, H34, H36, H38	—	—	—	—
5052	O, H32, H34, H36, H38	O, H32, H34, H112	O, H32, H34, H36, H38	—	—	—	—	O, F, H32	O, F	O, H32, H34, H36, H38	O, H32	—	O, H19	—
5056	—	—	—	—	—	—	—	O, F, H32	O, F	O, H111, H12, H14, H18, H32, H34, H38, H192, H392	O, H32	—	H19	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
包铝(Alclad) 5056	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H192, H392, H393	—	—	—	—
5083	O, H116, H321	O, H112, H116, H321	—	O, H111, H112	—	—	O, H111, H112,	—	—	—	—	H111, H112, F	—	—
5086	O, H112, H32, H116, H34, H36, H38	O, H112, H116, H32, H34	O, H32, H34, H36	O, H111, H112	—	—	O, H111, H112	—	—	—	—	—	—	—
5154	O, H32, H34, H36, H38	O, H32, H34, H112	O, H34, H38	O, H112	—	—	O, H112	O, H112, F	O, H112, F	O, H112, H32, H34, H36, H38	—	—	—	—
5252	H24, H25, H28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5254	O, H32, H34, H36, H38	O, H32, H34, H112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5454	O, H32, H34	O, H32, H34, H112	H32, H34	O, H111, H112	—	—	O, H111, H112	—	—	—	—	—	—	—
5456	O, H116, H321	O, H112, H116, H321	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H112, F	—	—
5457	O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5652	O, H32, H34, H36, H38	O, H32, H34, H112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
5657	H241, H25, H26, H28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6005	—	—	—	T1, T5	—	—	T1, T5	—	—	—	—	—	—	—
6053	—	—	—	—	—	—	—	O, H13	—	O, H13	T61	F, T6	—	—
6061	O, T4, T6	O, T451, T651	O, T4, T6	O, T1, T4, T4510, T4511, T51, T6, T6510, T6511	T6	T6	O, T1, T4, T4510, T4511, T51, T6, T6510, T6511	O, H13, T4, T451, T6, T651	O, T4, T451, T6, T651	O, H13, T4, T6, T89, T913, T94	T6	F, T6, T652	—	—
包铝(Alclad)6061	O, T4, T6	O, T451, T651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6063	—	—	O, T4, T6, T83, T831, T832	O, T1, T4, T5, T52, T6	T6	—	O, T1, T4, T5, T52, T6	—	—	—	—	—	—	—
6066	—	—	O, T4, T6	O, T4, T4510, T4511, T6, T6510, T6511	—	—	O, T4, T4510, T4511, T6, T6510, T6511	—	—	—	—	F, T6	—	—
6070	—	—	—	T6	—	—	T6	—	—	—	—	—	—	—
6101②	—	—	—	T6, T61, T63, T64, T65, H111	T6, T61, T63, T64, T65, H111	T6, T61, T63, T64, T65, H111	T6, T61, T63, T64, T65, H111	—	—	—	—	—	—	—
6105	—	—	—	T1, T5	—	—	T1, T5	—	—	—	—	F, T6, T652	—	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
6151	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6162	—	—	—	—	—	—	T5, T5510, T5511, T6, T6510, T6511	—	—	—	—	—	—	—
6201②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	T81	—	—	—	—
6262	—	—	T6, T9	T6, T6510, T6511	—	—	T6, T6510, T6511,	T6, T651, T9	T6, T651, T9	T6, T9	—	—	—	—
6351	—	—	—	T4, T6	T4, T6	—	T1, T4, T5, T51, T54, T6	—	—	—	—	—	—	—
6463	—	—	—	—	—	—	T1, T5, T6	—	—	—	—	—	—	—
7005	—	—	—	—	—	—	T53	—	—	—	—	—	—	—
7049	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	T73, T7352	—	—
7050	—	T7451③, T7651	—	—	—	—	T73510, T73511, T74510③, T74511③, T76510, T76511	H13	—	H13	T7	T74③, T7452③, F	—	—
7072	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	O, H14, H18, H19, H23, H24, H241, H25, H111, H113, H211

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
7075	T6，T73，T76	O，T651，T7351，T7651	O，T6，T73	O，T6，T6510，T6511，T73，T73510，T73511	—	—	O，T6，T6510，T6511，T73，T73510，T73511，T76，T76510，T76511	O，H13，T6，T651，T73，T7351	O，T6，T651，T73，T735	O，H13，T6，T73	T6，T73	F，T6，T652，T73，T7352	—	—
包铝（Alclad）7075	O，T6，T73，T76	O，T651，T7351，T7651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）单面7075	O，T6	O，T651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7008	O，T6，T76	O，T651，	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）7075	—	T7651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7175	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F，T74，T7452③，T7454③，T66	—	—
7178	O，T6，T76	O，T651，T7651	—	—	—	—	O，T6，T6510，T6511，T76，T76510，T76511	O，H13	—	O，H13	T6	—	—	—
包铝（Alclad）7178	O，T6，T76	O，T651，T7651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7475	T61，T761	T651，T7351，T7651	—	—	—	—	—	O	—	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）7475	T61，T761	T651，T7651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

合金	薄板	厚板	管材		管线	结构型材①	挤压线、圆棒、棒材、型材	轧制或冷精轧			铆钉	锻件和锻件毛坯	箔材	散热片毛坯
			拉制管	挤制管				圆棒	棒材	线材				
8017	—	—	—	—	—	—	—	H12，H22	—	H212	—	—	—	—
8030	—	—	—	—	—	—	—	H12	—	H221	—	—	—	—
8176	—	—	—	—	—	—	—	H14	—	H24	—	—	—	—
8177	—	—	—	—	—	—	—	H13，H23	—	H221	—	—	—	—

①轧制或挤制。 ②所列的这些合金产品仅为电工导体。 ③T74-型状态虽然以前未曾注册，但还是在不同的文献中出现过，并由具有如T736-型状态的技术指标。

引自铝标准和数据，1997，铝业协会，1997年3月。

平轧产品

平轧产品包括厚板、薄板和箔材。这些产品都是通过热轧和冷轧将铸锭的厚度经过一连串的压缩而得到的矩形横截面半成品。其变形加工硬化的性能受冷压缩的程度、使用部分或完全退火以及使用稳定化工艺的控制。用可热处理材料生产的厚板、薄板和箔材都可以进行固溶热处理、淬火、析出硬化和热应力或机械应力消除。

薄板和箔材也可轧制成有表面花纹的产品。用特制的轧辊可以将薄板和厚板压型成为有花纹的产品如花纹板。通过压型的波纹或其他形态的薄板可以应用于屋面板、侧板、管道和沟槽的用途。

厚板。指厚度大于6.3mm(0.250in)的产品。某些合金适用于厚度达200mm(8in)的厚板。特大型的厚板——如22mm(7/8in)厚×2.25m(89in)宽×32m(105ft)长——用于建造宽体飞机的机翼。厚板通常有剪切或锯切的边缘，并且能切制成圆形、矩形或特殊形状的坯料。某些合金厚板——特别是高强度2*xxx*和7*xxx*系列合金——也可用于包覆型产品。最为普通的厚板合金有用于飞机结构的2024、2124、2219、7050、7178和7475，用于舰船和低温及压力容器的5083、5086和5456，以及用于一般用途的1100、3003、5052和6061。表3.1-16列出了可用于一般锻造的不同合金。

薄板。当平轧产品的厚度为0.15～6.3mm(0.006～0.249in)时，其归类为“薄板”。薄板的边缘可以是剪切、剖切或锯切。薄板的供货形式为平板、卷材或用卷材按一定的长度切成一张张的。例如，目前的设备已能适应生产达5m(200in)宽×25m(1000in)长的大型薄板。铝薄板可以有多种表面粗糙度，从薄板外观不受控制的“轧制表面”一直到一面或两面均为光洁的“飞机蒙皮质量”的表面。也可以压型的、花纹的、油漆的或其他处理的表面形式供货。特殊产品还包括具有波纹的、V形射束状和带筋肋的屋面板和侧板、管道、散热片、记录环以及计算机存储盘。

包铝复合材料也属于标准产品中的一种，它们是以适当的阳极合金或铝包覆于经热处理的2*xxx*或7*xxx*合金的一侧或两侧表面上而构成的。根据薄板的厚度，其包覆厚度为薄板总厚度的1.5%～10%，百分比较大的用于较薄的产品。还有一类系列名为“钎料薄板”的产品。它们也是一种用钎料合金单面或双面包覆的复合材料。包覆的非热处理合金可供建筑业使用。包铝复合材料具有不同的精加工特性及整体着色性、外观一致性，并可改善耐腐蚀性。

除了少数的例外，1*xxx*、2*xxx*、5*xxx*和7*xxx*系列中的大部分合金都可以用于薄板型的产品生产(表3.1-16)。还有合金6061，它们能满足从制造业的硬件到运输装备和从器件到飞机结构的广泛用途。合金6009、6111和6022能广泛地应用于汽车车身、排气罩和覆盖件的冲压件。

箔材。这是一种厚度为0.15mm(0.006in)及其以下的产品。大部分的箔材都是以卷材供货，尽管也可以矩形规格(薄页)供应。铝箔最大的用途之一就是家用包装。箔材比起薄板具有更大范围的表面粗糙度。箔材常经化学或机械处理来满足一些特殊用途的需要。普通的箔材合金为1100、1145、1235、3003、5052和5056(表3.1-16)。高强度箔材合金有2024、5052或5056，用于生产铝合金整流栅芯，用于经连接的整流栅夹芯面板。

棒材、圆棒和线材

棒材(bar)、圆棒(rod)和线材均定义为一种长度相对其横截面尺寸特别大的实心产品。它们之间的差别仅在于横截面的形状和厚度或直径。当横截面是圆的或接近圆的，并直径大于10mm(3/8in)时被称为圆棒。当横截面是方的、矩形的或者是规则的多边形，并且在平行面之间至少有一处的垂直距离(厚度)大于10mm时，则称之为棒材的。而线材指的产品不论其横截面形状如何，其直径或平行面之间的最大垂直距离为10mm或更小。

圆棒和棒材能用热轧或热挤压进行生产，并可经(也可不经)进一步的冷变形加工使其达到最终尺寸。线材一般用拉拔通过一个或多个拉模进行生产和控制其尺寸，虽然也有用平轧方法的。为特别提高其耐腐蚀而生产的包覆圆棒和线材只能采用特定的合金。许多的铝合金都可用于棒材、圆棒和线材，其中2011和6262专门用于螺纹切削加工产品，而2117和6053则用于铆钉和管接头(表3.1-16)。合金2024-T4是一种用于螺栓和螺钉的标准材料。合金1350、6101和6201广泛作为电工导体应用。合金5056用于拉链，包铝的5056可用于捕虫网丝。

管制品

管制品(tubular products)包括管材(tube)和管线(pipe)。它们都是中空的锻压制品，而且相对其横截面也有很长的长度，并有均匀的壁厚，除非受弯角半径的影响。管材的横截面为圆、椭圆、方形、矩或规则多边形。将圆形管材产品的外径和壁厚的组合标准化，一般命名为“公称管径”和“ANSI管号”，并将其归类为管线。

管材与管线可以利用中空挤压坯料进行生产，采用穿通实心的挤压坯料或挤压通过一个分流组合模或桥式挤压模的工艺方法。它们也可以通过薄板成形和焊接的方法制造。管材借助于拉拔通过模具达到最终尺寸。作为一般用途的管材(无论挤压或拉拔)，都可采用合金1100、2014、2024、3003、5050、5086、6061、6063和7075(表3.1-16)。换热管使用最广的合金为1060、3003、包铝(Alclad)3003、5052、5454和6061。包铝管材只能用特定的合金，而且只可包覆单面(里面或外面)。能用于管线的合金有1350、3003、6061、6063、6101和6351(表3.1-16)。

型材

型材是一种长度大于其横截面尺寸的产品，而且横截面形状与薄板、厚板、圆棒、棒材、线材和管材都不一样。大部分的型材都是用挤压或挤压加冷精整的方法进行生产的，由于挤压工艺在经济上的优势，型材现在已很少用轧制的方法生产。型材可以是实心、空心(带有一个或多个空洞)或半空心的。6*xxx*系列(Al-Mg-Si)合金由于其易挤压性是生产型材中最常用的合金。2*xxx*和7*xxx*系列合金适用于强度要求较高的用途。

用合金6061制造成的标准结构型材如工字梁、槽形型材和角形型材，与相似结构的型钢不同且结构更简单，专为铝设计的式样要比为钢所设计的具有更好的截面性能和更高的结构稳定性，因此能得到更有效的应用。结构工程师和设计人员所需要的有关合金6061标准结构型材的尺寸、重量、性能以及其他数据可查阅由铝业协会出版的《铝结构手册》。

大部分的铝合金都可以进行精密挤压并得到良好的挤压表面，主要尺寸通常不需要切削加工，因为挤压后产品的公差允许制造人员通过切割、钻孔及其他一些少量的加工工序便可完成生产。

在很多情况下，一些长的飞机结构件需要在其一端部安装大型的连接附件。这样的构件利用带有台阶的，即在一个构件上有两个或多个不同横截面大小的挤压件进行切削加工往往更为经济，而不是利用横截面大小一样，且尺寸与连接附件一致的挤压件进行切削加工。

为满足其使用功能及外观的需要，铝型材生产的横截面设计可以有很大的不同。能否充分利用挤压工艺的这种特点则取决于设计者在开发新颖又实用的形状方面所具备的创新性。然而，挤压合金和横截面的设计对工装成本、生产率、表面粗糙度和生产成本均有很大的影响。因此在工艺的设计过程中，应该对挤压设备进行考察以便确保用途所要求的生产可行性、尺寸控制及所能达到的表面粗糙度。

生产可行性受金属流动特征的限制，并且还取决于合金成分、挤压温度、压力大小和形状复杂程度。型材根据生产可行性分为实心、空心和半空心的类型，按照其特征尺寸还能进一步分类。挤压的难易程度可以根据尺寸进行预估，还要把所挤压的合金考虑进去。

型材的整体尺寸会影响到挤压的难易程度及其尺寸公差。随着外接圆尺寸(完全包络型材的最小直径,见图3.1-16)的增大，挤压变得愈加困难。处于模面中心的金属流速是最快的。随着外接圆尺寸的增大，从型材的中心到外缘，其金属流动速度差也随之

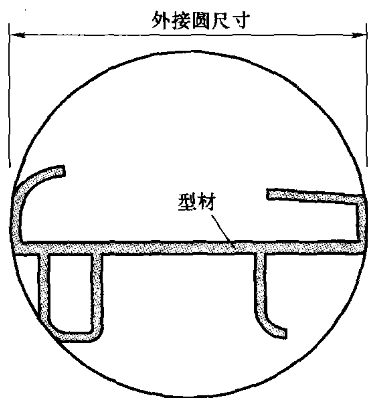


图3.1-16　使一个挤压型材特征化的外接圆法的图示

增加，故而使应对这种影响的模具设计和结构也徒增困难。

复杂性和生产的难度也会随“形状因数”的加大而增加，形状因数是型材横截面周长与单位长度的重量之比。厚度的增加有助于挤压，具有均匀厚度的型材是最容易挤压的。尽管厚度的加大会使重量和金属的成本增加，但挤压成本的提高会抵消金属成本的节省。由外接圆尺寸、型材类别和合金所决定的实际最小厚度极限值如表3.1-17所示。

用作挤压型材的合金选择，对生产可行性、成本以及最小厚度都有着重要的影响。对于某种特定的型材，受挤压件成分对其可能采用的挤压速度会有强烈的影响，而且挤压速度变化高达20倍(表3.1-18)。

表3.1-17　铝挤压件的标准制造极限

外接圆直径/in	最小壁厚/in				
	1060，1100，3003	6063	6061	2014，5086，5454	2024，2219，5083，7001，7075，7079，7178
实心和半中空的型材、圆棒和棒材					
0.5~2	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
2~3	0.045	0.045	0.045	0.050	0.050
3~4	0.050	0.050	0.050	0.050	0.062
4~5	0.062	0.062	0.062	0.062	0.078
5~6	0.062	0.062	0.062	0.078	0.094
6~7	0.078	0.078	0.078	0.094	0.109
7~8	0.094	0.094	0.094	0.109	0.125
8~10	0.109	0.109	0.109	0.125	0.156
10~11	0.125	0.125	0.125	0.125	0.156
11~12	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156
12~17	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188
17~20	0.188	0.188	0.188	0.188	0.250
20~24	0.188	0.188	0.188	0.250	0.500
类别1　中空型材①					
1.25~3	0.062	0.050	0.062	—	—
3~4	0.094	0.050	0.062	—	—
4~5	0.109	0.062	0.062	0.156	0.250
5~6	0.125	0.062	0.078	0.188	0.281
6~7	0.156	0.078	0.094	0.219	0.312
7~8	0.188	0.094	0.125	0.250	0.375
8~9	0.219	0.125	0.156	0.281	0.438
9~10	0.250	0.156	0.188	0.312	0.500
10~12.75	0.312	0.188	0.219	0.375	0.500
12.75~14	0.375	0.219	0.250	0.438	0.500
14~16	0.438	0.250	0.375	0.438	0.500
16~20.25	0.500	0.375	0.438	0.500	0.625
类别2和3　中空型材②					
0.5~1	0.062	0.050	0.062	—	—
1~2	0.062	0.055	0.062	—	—
2~3	0.078	0.062	0.078	—	—
3~4	0.094	0.078	0.094	—	—
4~5	0.109	0.094	0.109	—	—
5~6	0.125	0.109	0.125	—	—
6~7	0.156	0.125	0.156	—	—
7~8	0.188	0.156	0.188	—	—
8~10	0.250	0.188	0.250	—	—

①最小内部直径为外接圆直径的一半，但前三列的合金不小于1in，最后两列不小于2in。　②所有合金的最小孔的面积为0.110in^2，直径为0.375in。

表 3.1-18　铝合金的相对挤压性

合金	挤压性(相对于合金6063的比例,%)
1350	160
1060	135
1100	135
3003	120
6063	100
6061	60
2011	35
5086	25
2014	20
5083	20
2024	15
7075	9
7178	8

锻件

“自由锻锻件”一词用于指开式模锻件，一般在液压机上用平面或有轮廓形状的模具压制生产的锻件，其吨位可高达445MN(50000tf)。最常见的为矩形或圆形的横截面，并按经济长度(倍尺长度)生产，然后再截成短块。其种类一般包括状如“饼干”的盘状零件，以及较为复杂的坯料。其坯料的横截面可沿其长度而变化，或其坯料能压成弯曲、弧形或一定的轮廓形状。从这些锻件满足其锻打频次的需要上看，所要求的件数与型模的寿命和费用并不一定相适应。使用心轴锻造的环件是另一种类型的开式模锻产品。

用锻锤、机械压机或液压机生产的所有各种锻件的大小范围为45g(0.1lb)~1360kg(3000lb)或以上。450kg以下的锻件按常规进行生产，450~900kg(1000~2000lb)的较为罕见，而超过900kg(1000lb)的则是属于特殊件。

大部分的铝锻件都是用闭合式模具生产的，而且它们在所要求的形状细节和最终尺寸的接近程度上都能有很大的变化范围。作为“精密锻造”的锻件就是通过锻造最终完成的成形零件，基本上成为一种只需很少甚至不需要进行切削加工的净形零件。闭合式模锻件的优点就是其金相流线与零件的轮廓相一致。有时将其称为“晶粒流线的型式”。这种一致性对于静态强度和耐疲劳性非常有利(参见图3.1-14和图3.1-15)。从起始到终了的成形加工过程中，金属以不同方式镦粗和拉伸，以此进一步提高其最终力学性能。

工程产品的设计旨在使其产品在特定的机器或车辆中具有特定功能，然而对于特别与这些零件相关的模锻件，必须对其选用的锻造工艺及工艺装备所涉及的需求数量、工装、锻造和机加工的成本以及这些因素的实际影响在成本效益的基础上进行分析研究。在分析时，从作为极端情况的仅需极低工装成本的简单零件到有大批量订单的零件有很大的选择范围，通常生产时从一般切削加工裕量的零件至采用高额初始成本的精密锻造所用的模具工装，均需进行成本核算。

所使用的合金会影响其成本，并影响合金的相对可锻性(见图3.1-17)。这个因素再结合前面所讨论的内容可知，对于同样重量的零件其价格比可高达10:1。锻造模比挤压模更昂贵，根据截面的大小，两者价格比从3:1到4:1倍不等。关于如何利用公式中的系数，来决定零件是应当用棒材或厚板切削加工而成，还是用自由锻或模锻加工而成，将要在“产品经济性、选择和设计”一节中论述。在许多情况下模锻件可用于代替一组用铣削加工件和冲压件或型材制造而成的零件组装件。

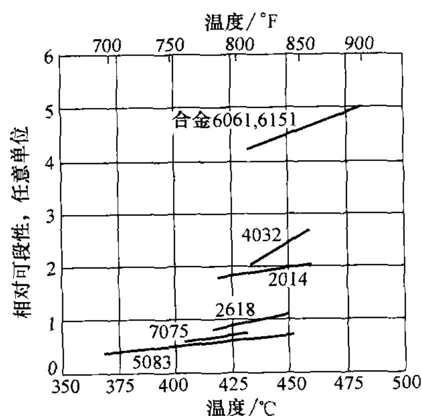


图3.1-17　七种铝合金的可锻性相对于温度的关系，其可锻性随任意单位(即该单位没有绝对意义,仅有相对比较的意义——译者注)**的增加而增加。**

2*xxx*、6*xxx* 和 7*xxx* 是用于锻件的最重要合金，1*xxx*、3*xxx*、4*xxx* 和 5*xxx* 也可用于生产，但是用得很少(表3.1-16)。为形成T8-型的状态受控应变硬化能力以及使用方面的局限性，会影响其中某些合金的应用。除用于航天工业以外，市场上最大吨位的锻件都是应用于汽车和货车车轮上的6061合金，而航天工业主要使用的锻件为 2*xxx* 和 7*xxx*(2014、2219、7049、

7050、7075和7175）合金。

在某些锻件厂利用心轴锻造或环轧制生产环形件。不同种类的典型模锻件所使用的合金及其状态、使用的锻造设备类型以及选用参数的评价等更多内容可参阅《ASM手册》第14卷：成形与锻造。

冲锻件

冲锻件是经过润滑的片状毛坯在一个封闭型模具里的锻压成形件，通常是冷态的，并通过金属冲模所施加的单冲程作用力，使得金属围绕着冲模或下模进行流动。这种工艺有很高生产率，并能按照严格的质量标准生产精密零件。冲锻就是冷挤压与冷锻相结合的工艺，于是它集中了锻造和挤压两种工艺的大部分优点。冲锻件在纵向方向具有的性能等于有相似成分的其他产品形式所规定的性能。

有三种能用于铝的基本类型的冲锻。反向冲锻应用于制造一种具有锻造底面和挤压侧壁的壳体。将片状坯料置于下模的型腔里，然后以冲模对其冲击，迫使金属围绕冲模反向（向上）流动，紧接着通过冲模与下模之间的缝隙，最后形成简单壳体。正向冲锻有些类似于一般的挤压，金属在冲模的作用下被挤压通过下模的小孔，使金属沿着冲模的移动方向流动。由于冲模与下模的精密配合使得金属无法反向流出。利用带有平面的冲模进行正向冲锻，以此形成圆形的、非圆形、直形和竹节形的圆棒，故用一种止端冲模的正向冲锻可用于生产一头通或两头通的平行侧壁或锥形侧壁的薄壁管件。如果冲模比下模小而下模又有小孔，就成为反向冲锻、正向冲锻结合生产出的组合冲锻件。

在设计铝冲锻件过程中，主要考虑是就是选择适合的合金。1100、2014、3003、6061、6351和7075均为铝冲锻件最常用的铝合金。这些合金能提供很大范围的力学性能，并且这些性能可以适合大多数的用途。一般来说，被冲锻的合金性能越强，模具的寿命越短，生产成本也越高。虽然每一种零件都应作为个案进行分析，但较强的合金一般要求较厚的最小壁厚。

合金1100是一种适用于农业、工业和海洋介质的耐腐蚀性极佳的合金，一般可以经冲锻成形为盛装液体和半液体材料的容器，如用于储存食物的容器以及喷涂所用的喷雾器。合金3003适用于许多与1100相同的用途，但它还是被用于比1100强度要求更高的用途。合金6061是可热处理的并有极佳耐腐蚀性的合金，广泛应用于制造汽车、飞机和船舰上的零件，尤其是需要焊接或要求高强度的用途。合金6351是一种具有从中到高的强度、可热处理的和有优良耐腐蚀性的合金。合金2014也是可热处理的并能应用于一般用途的合金，高的抗拉强度和屈服强度，及良好的塑性和耐疲劳性是其基本要求。它广泛应用于结构用途，以及飞机、汽车和军工零件上。合金7075具有这类合金中最高的强度和硬度。这种可热处理的合金可用于许多与2014相同的用途上，但每当要求最高强度和最小重量时，还是要选用它。

其他轧制品

散热片毛坯。它是卷状薄板和箔材，并且适用于制造有规定的合金、状态及厚度范围等要求的换热器叶片。如表3.1-16所示，普通用的合金包括1100、1145、3003和7072。

包铝制品。如前所述，铝制品有时利用纯铝或合金薄层的冶金结合进行单面或双面包覆。如果心部和包覆合金间结合所选用的包覆相对其心部为阳极，就将其称为包铝（alclad）。包铝制品的包覆是在裸露边缘和在擦伤或锈蚀区域对心部实施的是一种电化学保护。当腐蚀性溶液与制品发生接触时，电流将从阳极包覆层通过电解液流向阴极心部，而且包覆层往往具有选择溶解性，以此保护其心部。其持续保护性取决于获得最佳电流的大小（受包覆层与心部之间电位差的影响）、腐蚀介质的电导率、保护膜的形成以及极化强度（见本章第10节）。

在选择一种涂层时，由于是通过该涂层的充分阳极化对其心部实施电化学保护，因此包覆层与心部合金间的腐蚀电位是很重要的。铜在铝固溶体中的阳极性随铜含量的增加而降低。因此，纯铝相对于经自然时效的铝-铜-镁合金T3*x*和T4*x*状态的阳极电位约为0.154V，故可作为包覆层用于大部分包铝2*xxx*制品。固溶体中锌含量的增加能提高铝合金的阳极电位，而Mg_2Si和锰几乎没有影响。合金7072、Al-1Zn具有比纯铝更大的阳极电位，并作为包覆层用于3003、5052、6061和7075以及其他的一些包铝上。

尽管线材、管材等其他形式的制品也有生产，但应用最为广泛的包铝制品是薄板和厚板。制造包铝薄板和厚板的最广为采用的方法就是通过热轧将包覆扁锭压焊在经过表层剥离的心部铸锭上。在制造包铝制品中，热处理的温度和时间都应尽可能小，以防止可溶性元素从心部向外扩散。由于铜在包覆层中的扩散会使其阳极性降低，因此这对于2*xxx*合金特别重要。但对于含有锌和镁的合金就不太重要，因为这些元素能使包覆层阳极性提高。

包覆层的厚度百分比主要由精加工后零件的厚度

所决定。由于其目的是为了得到合适的绝对厚度，较厚零件的厚度百分比就不如较薄零件的大。大部分广泛使用的包铝制品如表3.1-19所示。

特种轧制品。用于屋面板、侧板和换热器管材的特种轧制品包括钎焊薄板和波纹管。这种轧制品和其他的轧制产品如表3.1-20所示。

表3.1-19　包铝制品的种类

代　号	合金组分①		复合产品的规定总厚度	包覆面	单面的包覆厚度占复合厚度的比例(%)		
	心部	包覆层			公称	平均② min	平均② max
包铝(Alclad)2014 薄板和厚板	2014	6003	≤0.024	双面	10	8	—
			0.025～0.039	双面	7.5	6	—
			0.040～0.099	双面	5	4	—
			≥0.100	双面	2.5	2	3③
包铝(Alclad)2024 薄板和厚板	2024	1230	≤0.062	双面	5	4	—
			≥0.063	双面	2.5	2	3③
1.5%包铝(Alclad)2024 薄板和厚板	2024	1230	≥0.188	双面	1.5	1.2	3③
包铝(Alclad)单面 2024 薄板和厚板	2024	1230	≤0.062	单面	5	4	—
			≥0.063	单面	2.5	2	3③
1.5%包铝(Alclad)单面 2024 薄板和厚板	2024	1230	≥0.188	单面	1.5	1.2	3③
包铝(Alclad)2219 薄板和厚板	2219	7072	≤0.039	双面	10	8	—
			0.040～0.099	双面	5	4	—
			≥0.100	双面	2.5	2	3③
包铝(Alclad)3003 薄板和厚板	3003	7072	全部	双面	5	4	6③
包铝(Alclad)3003 管材	3003	7072	全部	内表面	10	—	—
			全部	外表面	7	—	—
包铝(Alclad)3004 薄板和厚板	3004	7072	全部	双面	5	4	6③
包铝(Alclad)5056 圆棒和线材	5056	6253	≤0.375	外表面	20	16(占总横截面面积)	—
包铝(Alclad)6061 薄板和 厚板	6061	7072	全部	双面	5	4	6③
包铝(Alclad)7050 薄板和 厚板	7050	7072	≤0.062	双面	4	3.2	—
			≥0.063	双面	2.5	2	—
7108 包铝(Alclad)7050 薄板和厚板	7050	7108	≤0.062	双面	4	3.2	—
			≥0.063	双面	2.5	2	—
包铝(Alclad)7075 薄板和厚板	7075	7072	≤0.062	双面	4	3.2	—
			0.063～0.187	双面	2.5	2	—
			≥0.188	双面	1.5	1.2	3③
2.5% 包铝(Alclad)7075 薄板和厚板	7075	7072	≥0.188	双面	2.5	2	4③
包铝(Alclad)单面 7075 薄板和厚板	7075	7072	≤0.062	单面	4	3.2	—
			0.063～0.187	单面	2.5	2	—
			≥0.188	单面	1.5	1.2	3③
2.5% 包铝(Alclad)单面 7075 薄板和厚板	7075	7072	≥0.188	单面	2.5	2	4③

（续）

代号	合金组分①		复合产品的规定总厚度	包覆面	单面的包覆厚度占复合厚度的比例(%)		
	心部	包覆层			公称	平均② min	平均② max
7008 包铝(Alclad)7075 薄板和厚板	7075	7008	≤0.062	双面	4	3.2	—
			0.063 ~0.187	双面	2.5	2	—
			≥0.188	双面	1.5	1.2	3③
7011 包铝(Alclad)7075 薄板和厚板	7075	7011	≤0.062	双面	4	3.2	—
			0.063 ~0.187	双面	2.5	2	—
			≥0.188	双面	1.5	1.2	3③
包铝(Alclad)7178 薄板和厚板	7178	7072	≤0.062	双面	4	3.2	—
			0.063 ~0.187	双面	2.5	2	—
			≥0.188	双面	1.5	1.2	3③
包铝(Alclad)7475 薄板	7475	7072	≤0.062	双面	4	3.2	—
			0.063 ~0.187	双面	2.5	2	—
			0.188 ~0.249	双面	1.5	1.2	—
No. 7 钎焊薄板	3003	4004	≤0.024	单面	15	12	18
			0.025 ~0.062	单面	10	8	12
			≥0.063	单面	7.5	6	9
No. 8 钎焊薄板	3003	4004	≤0.024	双面	15	12	18
			0.025 ~0.062	双面	10	8	12
			≥0.063	双面	7.5	6	9
No. 11 钎焊薄板	3003	4343④	≤0.063	单面	10	8	12
			≥0.064	单面	5	4	6
No. 12 钎焊薄板	3003	4343④	≤0.063	双面	10	8	12
			≥0.064	双面	5	4	6
No. 23 钎焊薄板	6951	4045	≤0.090	单面	10	8	12
			≥0.091	单面	5	4	6
No. 24 钎焊薄板	6951	4045	≤0.090	双面	10	8	12
			≥0.091	双面	5	4	6
包覆 1100 反光薄板	1100	1175	≤0.064	双面	15	12	18
			≥0.065	双面	7.5	6	9
包覆 3003 反光薄板	3003	1175	≤0.064	双面	15	12	18
			≥0.065	双面	7.5	6	9

①包覆层成分仅适用于粘结在合金铸锭或扁锭上的铝或铝合金，以加工特定的复合制品。由热处理引起的心部和包覆层之间的扩散会造成包覆层的成分变化。 ②在显微镜下用放大100倍的镜头测量经抛光和腐蚀的样品横向截面，通过其平均测量值求出其单面的平均厚度。 ③适用于厚度0.500in及以上尺寸。 ④包覆层组分可为5%的1xxx包覆4343，可以代替4343合金。

表3.1-20　特种轧制产品

特种产品编号	特种产品描述		状　　态
	形　　式	合　　金	
钎焊薄板			
No. 11 和 12	薄板	用4343单面包覆3003(No. 11)或双面包覆(No. 12)	O，H12，H14
No. 23 和 24	薄板	用4045单面包覆6951(No. 23)或双面包覆(No. 24)	O
反光薄板			
包覆1100	薄板	用1175单面或双面包覆1100	—
包覆3003	薄板	用1175单面或双面包覆3003	—
涂漆薄板	卷板	1100，3003	O，H12，H14，H16，H18
	卷板	3105	O，H12，H14，H16，H18，H25
	卷板	5005，5050，5052	O，H32，H34，H36，H38
民用屋面板和侧板			
波纹屋面板和侧板	薄板	3004，包铝(Alclad)3004	—
V形波纹屋面板和侧板	薄板	3004，包铝(Alclad)3004	—
带筋屋面板	薄板	包铝(Alclad)3004	—
带筋侧板	薄板	3004，包铝(Alclad)3004	—
通道薄板	卷或平形薄板	具有16.0ksi最小抗拉强度的合金和状态	—
台阶板	单面上有凸起花型的薄板和厚板	6061	O，T4，T6
换热器管	管材	1060 3003 包铝(Alclad)3003 5052 5454 6061	H14 H14，H25 H14，H25 H32，H34 H32，H34 T4，T6
刚性电缆导管	管材	3003 6063	H12 T1

产品的经济性、选择和设计

当从“性价比”的角度出发选择材料时，选择特定材料的真正依据仅仅是在满足全部功能要求的前提下，使其整体成本为最低。所选用的材料应是最具有性价比的，因为：①其初始成本是最低的，而且在使用及其耐用度方面至少等于任何能替代它的材料；②由于有最低的运行和维护成本，故从长期运行看，它也是最为经济的；③它具有任何其他材料所无法比拟的特殊性能。这些考虑常会由于如法规或“能源危机”所引起的一些人为因素而受到影响。它们有时还要受到可行性或交货期等因素的很大影响，或甚至被排除在候选材料之外。

依据性价比在铝与其他材料之间做出选择有时很简单，但有时也十分复杂。这时，其选择会因为相对成本的变化而一次次地改变。在很多情况下首先需考虑的是切削加工、连接、可精加工性以及物理性能(主要为密度、导热性和反射率)。由于铝的型材和锻

制品能提供无数的设计可能性，所以大大增强了铝在这方面竞争中所处于的优势地位(铝的工程铸件也能提供许多这种优点)。

选择产品的依据主要在于其形状、尺寸和力学性能的要求。要求包括：①所用的坯料能覆盖或包络某一面积，填充一定的空间，连接或附于其他坯料上；②用于通过或盛装流体或气体；③其坯料要受重量或其他因素的制约。在像箔材、线材、管材或大面积薄板的应用情况里，要为产品做出最佳选择几乎没有什么问题。但在另外的一些情况里，要想在不同的产品中做出明智的选择却是一个复杂的工程问题，会涉及除其产品自身的初始成本以外的许多其他因素。成形件或模锻件常具有在单一毛坯件上附有如加强肋、散热片和凸起或凸缘等结构特征的优点，故可用于替代必须经过切割、成形和连接而成的多件毛坯。在判断某种合金及其状态用于特定类型产品上是否具有可行性的情况里，其力学性能的考虑是很重要的。挤压件相对轧制或锻造产品具有较高的纵向静态强度，或者其金相组织取向(或晶粒流线)与表面轮廓的相吻合，这同样也是模锻件具有的特征。

在最为严格的结构用途里，最严重的危害是由动态应力、装配干涉或错误配合所引起的静态应力与动态作用应力相结合以及腐蚀性环境所造成的。为了防止发生由疲劳裂纹或应力腐蚀裂纹造成的早期失效，最重要的是通过一种好的设计将这种应力、应力集中以及在腐蚀性介质中的暴露都降到最低限度。产品类型和合金及其状态的选择也在设计中起着重要的作用。

产品尺寸及其公差

前面已经论述过，箔材、薄板和厚板可以采用的厚度范围。按规定，箔材的厚度不大于 0.15mm (0.006in)，在某些用途里，可薄至 0.0043mm (0.00017in)；薄板的厚度范围为大于 0.15 ~ 6.3mm (大于 0.006 ~ 0.249in)，厚板的厚度范围为 6.3 ~ 接近 200mm(0.250 ~ 接近 8in)。相应的宽度、长度和卷料大小极限都可同生产厂家商洽而定。

所有轧制品的标准尺寸公差均可查询美国国家标准协会的文件 H35.2-1993、ASTM 标准汇编的 02.02 卷以及铝业协会颁布的《铝标准和数据》。有关厚度、宽度、长度、直径、方度、平度、直度、横向拱度和扭曲度的尺寸公差均因产品种类而异，本手册不再列表介绍了。

包括圆棒和棒材在内的挤压产品以及其他实心、空心和半空心型材的最大外接圆尺寸和最小壁厚的极限尺寸均与其合金有关，如表 3.1-17 所示。作为标准产品，铝业协会编制了用合金 6061-T6 生产的结构型材(角铝、槽铝、工字梁、H 形梁、T 形及 Z 形梁)的不同尺寸。由铝业协会颁布的《铝标准和数据》还详细列表提供了这些标准结构型材的尺寸、每英尺长度的重量和截面性质(惯性矩、截面模数和回转半径)——都是对设计十分有用的数据。这些数据以及同时颁布的有关标准管线尺寸的那些数据，在本手册里不再重复了。

在模锻件的设计中，用到的极限尺寸包括总的可加工面积，对机械压机压制的锻件为接近 0.3m^2(接近 500in^2)，对锤锻锻件为接近 1.9m^2(接近 3000in^2)和对最大的液压机压制的零件为接近 3.2m^2(接近 5000in^2)。其他的极限设计参数有板厚、筋的宽度和高度、拔模斜度以及倒角和拐角的最小半径。

圆柱形和其他轴对称的型材都是冲锻最容易生产的，当然非轴对称的型材也可以生产。纵向筋肋可以安置在无论内侧还是外侧的侧壁上。凸耳、凸台、沟槽、凹坑以至筋肋都能安置在整体轮廓的端部或基体上。作为尺寸极限有：最大直径(取决于压机大小)、长径比(最大为 18:1，较常用的为 12:1)及最小壁厚。所有这些形状因素都与合金种类有关。

锻压产品的有效设计和应用

一种好的铝制品设计可以定义为让其能力得到最有效的利用。它的一个著名例子就是两片型全铝饮料罐的设计。相对高强度的合金(3004 用于罐体，5182 用于罐盖)，薄板卷料经极高的速度轧制后进行深拉和校正正生产成为罐体，与此同时压合上易于开启的罐端盖。这两个制造工序均以极高的速度生产。将其最低的初始成本所形成的有效经济性、较低的运输成本(因为重量轻)及其所具有的可回收性和功能优势相结合，这样就使得这种饮料罐在激烈的市场竞争中成为一种极富生命力的成功产品。这种饮料罐除了大批量地被一次性消费之外还是一种压力容器，为此要求在合金强度、制造性和设计三者之间达到其可能的最佳平衡。在使其获得成功的各因素中，生产这种饮料罐的工装设计也起到了关键作用。

行驶于高速公路上的货运挂车的顶面板和侧板是兼具初始成本和寿命成本优点的又一个高效益和大量使用铝合金薄板的案例。它们所用的是一种单壳体式(应力覆盖层)的结构，并具有适度高强度的非热处理合金。作为飞机的机翼、控制器表面和机身(压力容器)的覆盖层，在成本和功能方面同样也都十分有效。这些用途所用的是高强度、可热处理合金，用于

适应从中等到恶劣的工况条件。在某些情况，如借助特殊的机车车厢将刚刚经过淬火的、非常长的机翼覆盖板通过铁路从其轧制厂到飞机制造厂的横贯大陆的运送过程中，由于冷冻作用而使其良好的成形性得以保持。铝薄板在每年生产和销售的全部铝轧制品中所占的百分比(1996 年接近 60%)之高，足以在数不清的应用中证明其通用性和高效性。

厚板。对于许多用途来说，选用厚板是顺理成章的。举一个例子，一种用于宇宙飞船的大型焊接储罐由经成形和焊接的板件构成，它们能起到储存燃料和氧化剂(冷冻液)以及形成飞船结构的双重作用。对于这样的用途以及飞机机翼，厚板可以通过大面积的切削和化学蚀铣形成整体加强肋或栅格花型。当只要求纵向加强肋时，也可用具有整体筋肋的挤制板产品。

对于某些设计，切削加工也许是最为经济的生产工艺，因为其装夹时间构成了切削成本的大部分。例如图 3.1-18 所示，在生产批量 600 件以下，切削加工的厚板是生产这种铝产品最便宜的方法。到此节点的产量则可以充分补偿挤压模具的成本。对于有双面覆盖层的组合设计件，其重量较重而且费用也较高。

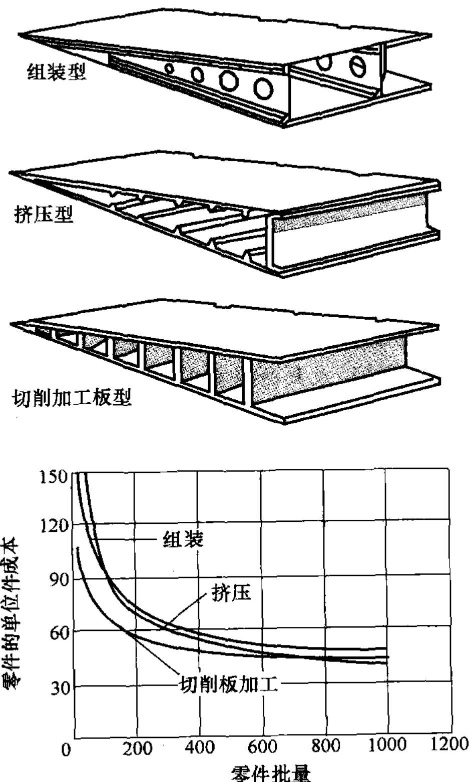


图 3.1-18 以三种方法生产合金 2024-T4 零件的成本比较

化学蚀铣(在碱或酸溶液中将金属去除)是一种专门用于铝的加工工艺。为了使在大面积上有复杂或波形表面轮廓的扁平零件能稍微减小一些厚度，化学蚀铣通常是最为经济的方法。

对于在切削后无法进行成形加工的金属薄板零件，化学蚀铣是仅有的可行方法，利用这种方法去除金属，并获得像威化饼干状的格栅结构以及均匀的覆盖厚度。即使如此，其尺寸允差的确定常需考虑到金属除去后所造成的尺寸反弹，以及由此形成的残余应力再分布。

化学蚀铣通常会生成增强覆盖层，其厚度公差为 ±0.13mm(±0.005in)，而在未铣表面上仍留下完好无损的包覆层。在厚度超过 3mm(1/8in)薄板上进行覆盖层机械铣削时，由于夹持上的限制，而必须是一种使夹持表面保持平整的“清创铲刮”式的切削。

挤压型材。由于挤压件具有很大的设计通用性、优良的表面质量以及精确的尺寸，所以它们往往不用进行大量的切削加工。根据挤压制品的形状和尺寸精度，加工者只需进行简单的切断、钻孔、铰孔或其他少量的切削工序便可完成零件的加工。对于任何能以挤压件进行生产的零件，生产了一定数量的零件之后，其挤压模的成本便可忽略不计了。

切削加工成本也许是惟一的选择依据。在图 3.1-19 中，这可以用一个燃料箱连接附件的成本曲线图予以说明。这个零件的设计允许采用挤压件，与使用实心棒材制造同样的零件相比，它只需非常少的切削加工。只要产量达到 100 件，其单件成本就可得到明显的降低。

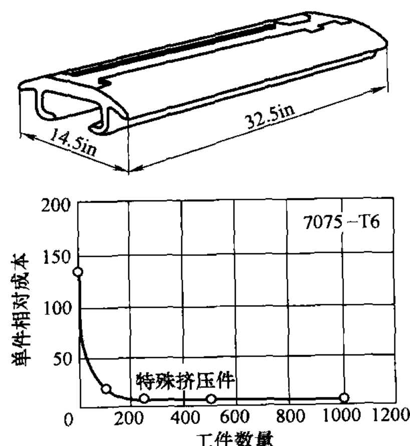


图 3.1-19 挤压燃料箱连接件的成本与产量的关系。以棒材毛坯完全切削加工的零件成本设为 100

相互连接的型材。这种产品正在大量增加，它包含一种在挤压型材设计上相互连接的结构，以此便于其装配成相类似的型材或成为另外一种产品。它可以通过一种简单的台阶实现平滑的搭接，或者通过榫槽结合实现嵌接（见图3.1-20）。这种连接借助任何普通的接合方法使之安全、可靠。特别要注意，当接头用弧焊焊接时，相互连接的搭接和嵌接都要将焊缝设计成为坡口和/或整体背衬（见图3.1-20的右下图）。

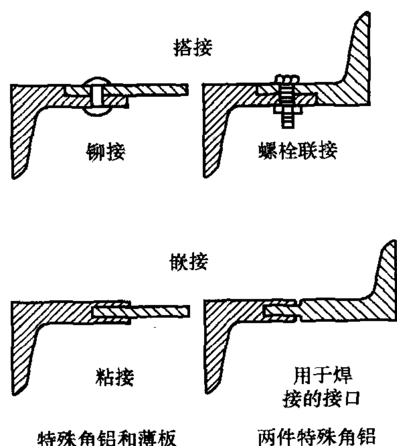


图3.1-20　相互连接挤压件的四种举例（它们相互配合或与其他产品相配合），以及四种连接方法

互锁式连接可设计成为包含一个能灵活转动的铰链（见图3.1-21的上图），此时其中一个零件沿纵向进入另一个零件的配合部分。带有铰链的板型挤压件可以在输送带和转动门上得到应用。

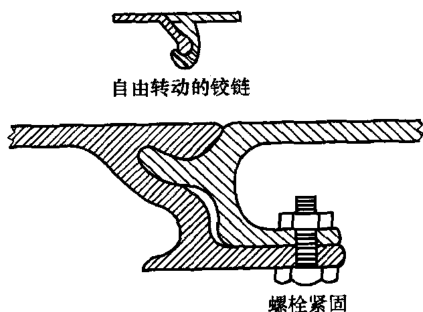


图3.1-21　挤压件非永久相互连接的两个例子

嵌接型用于相互连接中，其装配要求是一个零件能相对与之相配的零件转动（见图3.1-21的下图）的一种较为常见的、具有互锁特点的结构。这种连接可以借助重力或机械装置连接在一起。如果不要求永久连接，可以使用螺栓或其他紧固件（见图3.1-21的下图所示）。

当需要一种永久的连接时，可以在互锁的挤压件上增加卡锁或弯锁的结构（见图3.1-22）。弯锁结构也可用于互锁挤压件与薄板之间的永久连接（见图3.1-22）。在挤压件上还能有纵向齿形或锯齿的结构，用于永久性地抓住光滑表面或具有与之相配的齿形或锯齿的表面，如图3.1-22的下图所示。

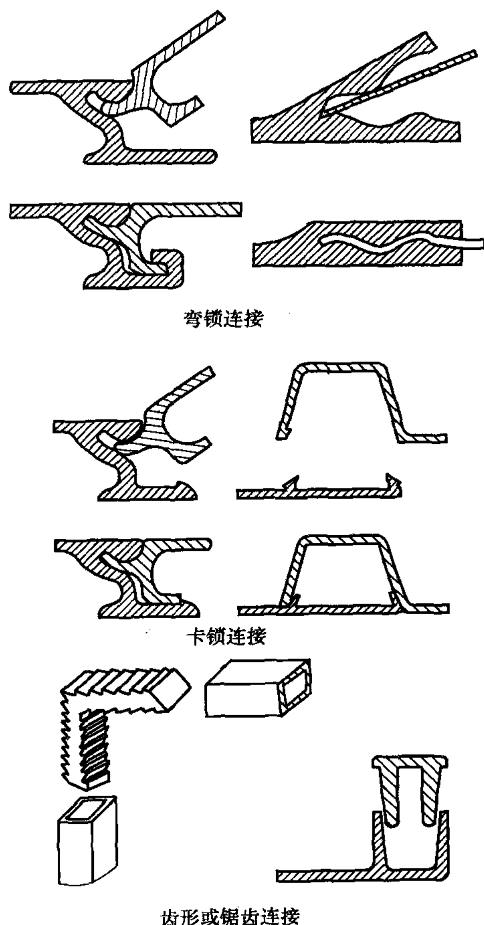


图3.1-22　相互连接的挤压件相互锁在一起或锁在其他产品上的六个例子

相互连接的挤压件的应用包括门、墙体、天花板、地板、货架、飞机着陆底板、高速公路信号牌、窗框和大型气缸。

模锻件。铝模锻件所具有的几何形状多样性往往使它们在应用中赢得优先选择，而且因为其制造无需高额成本的机加工、连接或装配工序，与能得到同样功能的其他方法相比，产品常在总体上位居评价分析的前茅。当要在使用棒材或厚板毛坯进行加工和购买模锻件之间进行抉择时，工装（模具）的成本将会在抉择中起主要作用。另外，不同产品的不同锻压组织方向也是主要的决定因素，这种方向性会对所期待的

抗方向应力和适应使用环境的能力产生影响。

用棒材或扁料加工数件零件的成本，通常低于制造模具并通过锻造来生产同样这些零件所需要的成本。当生产更多数量的零件时，锻造通常是成本低廉的方法。至于两者间的边界条件，有必要对其加工和模具的成本进行仔细分析，以此确定其跨越点。为确定这一点，只需计算模具的初始成本，因为锻件的供应商有义务承担由损坏和磨损造成的模具更换成本。这种更换成本是包含在锻件的价格内的。模具成本因零件的尺寸和复杂性而异。

图3.1-23是一件模锻件（零件A）与一件组合设计件的比较。虽然粗锻件上75%的金属都要被切去，但是当数量超过125件时，经切削的锻件比组装的更经济。

对于一些大型复杂的锻件，跨越点会在第一个或第二个锻件上。但是如果仅仅需要为数不多的零件，还是会采取在相对便宜的粗锻模具上对零件进行粗锻然后通过切削完成零件的加工，使用这种技术能在付出低于单以锻造达到其最终尺寸所需要成本的条件下，使锻件形成所需要的金属流从而使性能获得很大的改善。

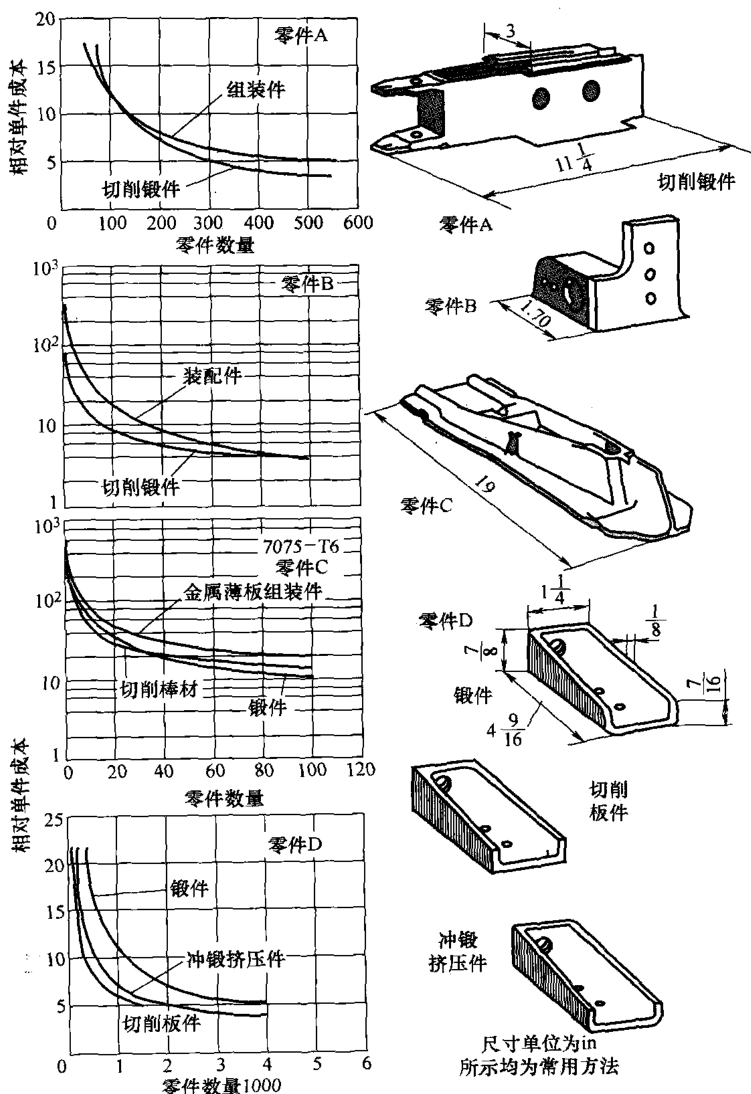


图3.1-23　铝模锻件与用其他方法制造的相似零件的相对成本。零件A为组合设计件与模锻件之间的比较。粗锻件的全部表面都要切削，且只有制造了大约125件的锻压制品后，其制造成本才会显著下降。零件B是较为简单的零件，并以100件的数量将其锻件与用棒材切削而成的成本进行比较。对于更复杂的锻件（零件C），棒材切削成本超过锻件的跨越点数量为40件。作为相对简单的零件D，制造成模锻件、冲锻挤压件和中空零件时，锻造是最贵的方法。数量到3000件，挤压件和用板材切削而成零件的成本才差不多相同

图3.1-23中的曲线比较了不同尺寸和形状的零件，以可竞争的不同方法进行生产所形成的成本。对于简单的零件B，其跨越点大概发生在100件。对于复杂的锻件（零件C），其跨越点发生在40件。确定这两种零件成本的依据包括生产厂的生产熟练曲线、单件生产劳务费、生产准备费用的分摊、劳务费、工装成本（包括模具和夹具）、原材料费和管理费用。

模锻件并不总是大批量零件生产成本最低的方法。分别用模锻、冲锻挤压和用厚板切削加工生产一种较为简单的零件（见图3.1-23中的零件D），以此分析其生产成本。切削加工的零件对各种产量都比较经济，因为模锻所需要的精加工工序成本非常接近于单用切削加工生产零件的成本。这个零件的薄壁和深凹槽最为理想适用的方法应该是冲锻挤压。分析还表明作为小批量生产，这种制造方法只比切削加工稍稍贵了一些，而对于3000件以上的批量成本才会一致。

图3.1-23以零件为例，说明了设计与成本间的关系，并强调了对上述每一种制造方法的成本进行仔细分析的必要性。

精密锻件。铝合金精密锻件是一种应用日益广泛，而且其技术长足进步和锻造工业对其投资不断增长的工业锻造制品。精密铝锻件通常不要求用户再进行切削加工，有时只需在上面钻一些安装孔。它还可以作为具有非常薄的筋肋和辐板，以及锐利的凹角、倒角、凹槽、反斜度等各种轮廓形状，以及能优化晶粒流动特性的多分型面之类的产品进行生产。

从能直接获得最终铝合金形状的各种候选方法中选择精密锻造时，要根据对存疑的特定形状所作的经济分析来决定。图3.1-24所示是用厚板切削加工、用一般铝锻件的切削加工和精密锻造三种方法生产的管形的铝合金零件的成本比较，作为产量的函数它们的成本包括全部材料的利用、工装、生产准备和制造成本。精密锻造法对一般锻造法的产量跨越点为50件，并且精密锻造与用厚板切削的成本相比也总是低一些。图3.1-24还表示了精密铝合金锻件潜在的成本优势。一般可以发现，当与包括为得到最后成品零件的多轴切削在内的其他制造技术相比时，精密铝锻件具有很高的成本效益。

通过锻造工业及一些用户的最近评估，表明精密铝锻件能比切削加工厚板降低的最终成品零件的成本高达80%~90%，比切削加工一般锻件的高达60%~70%。而降低的切削加工的劳务费高达90%~95%。

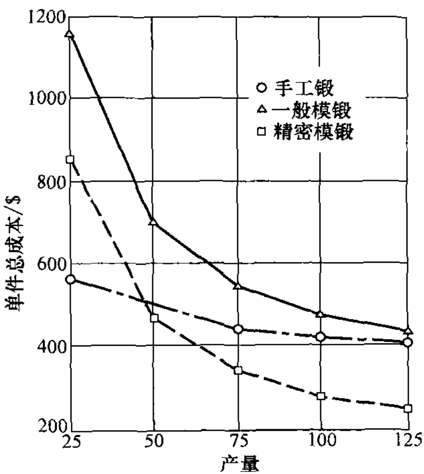


图3.1-24 7075-T73铝合金零件的制造成本比较

锻压和工程产品的技术指标

在美国，锻压铝产品的技术指标和标准是由ASTM、政府机构(用于军事和联邦政府的技术指标)、国际SAE(航空航天材料的技术指标，AMS)、美国机械工程师学会(ASME)以及美国焊接学会(AWS)颁布的。表3.1-21列出了有关锻压铝产品的不同技术指标的相互对照。

表3.1-21 铝轧制产品的技术指标

合金	产品	技术指标					
		ASTM	军事	联邦	AMS	ASME	AWS
1060	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	线材、圆棒和棒材；轧制或冷精轧	B211	—	—	—	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	SB210	—
	管材：冷凝器	B234	—	—	—	SB234	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
	管材：带有整体散热片的冷凝器	B404	—	—	—	—	—
1100	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/1	4001	SB209	—
		—	—	—	4003	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	QQ-A-225/1	4102	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：挤制、卷料	B491	—	—	—	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—

（续）

合　金	产　品	技术指标					
		ASTM	军　事	联　邦	AMS	ASME	AWS
1100	管材：拉制、无缝	B210	—	WW-T-700/1	4062	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
	铆钉用线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430		—	—
	喷射枪线材	—	MIL-W-6712	—	4180	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	—	—	—
	焊条：无焊药	—	—	—	—	A5.10	—
	冲锻	—	MIL-A-12545	—	—	—	—
	箔材	B479	—	QQ-A-1876	—	—	—
1145	箔材	B373，B479	—	QQ-A-1876	4011	—	—
1235	箔材	B373，B479	—	QQ-A-1876	—	—	—
	管材：挤制、卷料	B491	—	—	—	—	—
1350	铝导体：增强钢	B232	—	—	—	—	—
		B401	—	—	—	—	—
	总线导体	B236	—	—	—	—	—
	轧制重拉圆棒	B233	—	—	—	—	—
	绞合导线	B231	—	—	—	—	—
		B400	—	—	—	—	—
	线材：H19 状态	B230	—	—	—	—	—
	线材：H14 状态	B609	—	—	—	—	—
	线材(矩形和方形)	B324	—	—	—	—	—
	圆实心导线	B609	—	—	—	—	—
2011	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制和冷精轧	B211	—	QQ-A-225/3	—	—	—
2014	薄板和厚板	B209	—	—	4029	—	—
		—	—	—	4028	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制和冷精轧	B211	—	QQ-A-225/4	4121	SB211	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	4153	—	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771	—	4134	SB247	—
		—	—	—	4133	—	—
	环件：锻造和轧制	—	—	—	4314	—	—
	冲锻	—	MIL-A-12545	—	—	—	—
包铝(Alclad)2014	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/3	—	—	—

（续）

合　金	产　品	技术指标					
		ASTM	军　事	联　邦	AMS	ASME	AWS
2017	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	QQ-A-225/5	4118	—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
2018	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	4140	—	—
2024	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/4	4037	—	—
		—	—	—	4035	—	—
		—	—	—	4192	—	—
		—	—	—	4193	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制和冷精轧	B211	—	QQ-A-225/6	4112	SB211	—
		—	—	—	—	—	—
		—	—	—	4165	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	4152	SB221	—
		—	—	—	4164	—	—
		—	—	—	4165	—	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	MIL-T-50777	WW-T-700/3	4087	—	—
		—	—	—	4088	—	—
	管材：液压	—	—	—	4086	—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
	箔材	—	MIL-A-81596	—	—	—	—
包铝（Alclad）2024	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/5	4041	—	—
		—	—	—	4040	—	—
		—	—	—	4194	—	—
		—	—	—	4195	—	—
包铝（Alclad）单面2024	薄板和厚板	—	—	—	4036	—	—
		—	—	—	4077	—	—
2025	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	4130	—	—
2117	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
2124	厚板	B209	—	QQ-A-250/29	4101	—	—
2218	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	4142	—	—
2219	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/30	4031	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	—	—	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	4162	—	—
		—	—	—	4163	—	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	4068	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	4066	—	—

（续）

合金	产品	技术指标					
		ASTM	军事	联邦	AMS	ASME	AWS
2219	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771	—	4143	—	—
		—	—	—	4144	—	—
	装甲厚板	—	MIL-A-46118	—	—	—	—
	环件：轧制或锻造	—	—	—	4313	—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
包铝(Alclad)2219	薄板和厚板	B209	—	—	4094	—	—
		—	—	—	4095	—	—
		—	—	—	4096	—	—
2319	焊条：无焊药	—	—	—	4191	—	A5.10
2618	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771	—	4132	—	—
3003	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/2	4006	SB209	—
		—	—	—	4008	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	QQ-A-225/2	—	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：挤制、卷料	B491	—	—	—	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	WW-T-700/2	4065	SB210	—
		—	—	—	4067	—	—
	管材：冷凝器	B234	—	—	—	SB234	—
	管材：带整体散热片的冷凝器	B404	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
	管线	B241	MIL-P-25995	—	—	SB241	—
	管线：油、气输送	B345	—	—		—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430		—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	—	SB247	—
	箔材	—	MIL-A-81596	—	4010	—	—
包铝(Alclad)3003	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	SB210	—
	管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：冷凝器	B234	—	—	—	SB234	—
	管材：带整体散热器的冷凝器	B404	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B547	—	—	—	—	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—

（续）

合　金	产　品	技术指标					
		ASTM	军　事	联　邦	AMS	ASME	AWS
3004	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）3004	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
3005	薄板	B209	—	—	—	—	—
3105	薄板	B209	—	—	—	—	—
4032	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	—	—	—
4043	焊条：无焊药	—	—	—	4190	—	A5. 10
	喷射枪线材	—	MIL-W-6712	—	—	—	—
4045	金属钎焊条	—	—	—	—	—	—
4047	金属钎焊条	—	MIL-B-20148	—	4185	—	—
	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5. 10
4145	金属钎焊条	—	MIL-B-20148	—	4184	—	—
	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5. 10
4343	金属钎焊条	—	—	—	—	—	—
4643	焊条	—	—	—	4189	—	A5. 10
5005	薄板和厚板	B209	—	—	—	—	—
	线材：H19 状态	B396	—	—	—	—	—
	绞合导线	B397	—	—	—	—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430		—	—
	圆棒：轧制	B531	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
5050	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
5052	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/8	4015	SB209	—
		—	—	—	4016	—	—
		—	—	—	4017	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	QQ-A-225/7	4114	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—

（续）

合金	产品	技术指标					
		ASTM	军事	联邦	AMS	ASME	AWS
5052	管材：拉制、无缝	B210	—	WW-T-700/4	4069，4070	SB210	—
	管材：液压	—	—	—	4071	—	—
	管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：冷凝器	B234	—	—	—	SB234	—
	管材：带整体散热片的冷凝器	B404	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
	箔材	—	MIL-A-81596	—	4004	—	—
5056	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	—	4182	—	—
	箔材	—	MIL-A-81596	—	4005	—	—
包铝（Alclad）5056	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	MIL-C-915	—	—	—	—
5083	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/6	4056	SB209	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B547	—	—	—	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	—	SB247	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
	装甲厚板	—	MIL-A-46027	—	—	—	—
	挤制装甲	—	MIL-A-46083	—	—	—	—
	锻造装甲	—	MIL-A-45225	—	—	—	—
5086	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/7	—	SB209	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	WW-T-700/5	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
5154	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	—	—	SB221	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB210	—

（续）

合金	产品	技术指标					
		ASTM	军事	联邦	AMS	ASME	AWS
5154	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
5183	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5.10
5252	薄板	B209	—	—	—	—	—
5254	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	—	—
5356	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5.10
5454	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/10	—	SB209	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：冷凝器	B234	—	—	—	SB234	—
	管材：带整体散热片的冷凝器	B404	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B547	—	—	—	—	—
5456	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/9	—	SB209	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	装甲厚板	—	MIL-A-46027	—	—	—	—
	挤制装甲	—	MIL-A-46083	—	—	—	—
	锻造装甲	—	MIL-A-45225	—	—	—	—
5457	薄板	B209	—	—	—	—	—
5554	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5.10
5556	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5.10
5652	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	—	—
5654	焊条：无焊药	—	—	—	—	—	A5.10
5657	薄板	B209	—	—	—	—	—
6005	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
6053	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
6061	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/11	4025	SB209	—
		—	—	—	4026	—	—
		—	—	—	4027	—	—
	轧花厚板	B632	—	—	—	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	QQ-A-225/8	4115	SB211	—
		—	—	—	4116	—	—

（续）

合 金	产 品	技术指标					
		ASTM	军 事	联 邦	AMS	ASME	AWS
6061	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	—	—	—	4117	—	—
		—	—	—	4128	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	4150	—	—
		—	—	—	4160	—	—
		—	—	—	4161	—	—
		—	—	—	4172	—	—
		—	—	—	4173	—	—
	结构型材	B308	—	—	4113	SB308	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	WW-T-700/6	4079	SB210	—
		—	—	—	4080	—	—
		—	—	—	4082	—	—
	管材：液压	—	—	—	4081	—	—
		—	—	—	4083	—	—
	管材：冷凝器	B234	—	—	—	SB234	—
	管材：带整体散热片的冷凝器	B404	—	—	—	—	—
	管材：焊接	B313	—	—	—	—	—
		B547	—	—	—	—	—
	管线	B241	MIL-P-25995	—	—	SB241	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771	—	4127	SB247	—
		—	—	—	4146	—	—
		—	—	—	4248	—	—
	环件：轧制或锻造	—	—	—	4312	—	—
	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
	冲锻件	—	MIL-A-12545	—	—	—	—
	结构管线和管材：挤制	B429	—	—	—	—	—
	箔材	—	—	—	4009	—	—
包铝（Alclad）6061	薄板和厚板	B209	—	—	—	SB209	—
		—	—	—	4021	—	—
6063	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	4156	SB221	—
	管材：挤制、无缝	B241	—	—	—	SB241	—
	管材：挤制、卷料	B491	—	—	—	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	SB210	—

（续）

合　金	产　品	技术指标					
		ASTM	军　事	联　邦	AMS	ASME	AWS
6063	管线	B241	MIL-P-25995	—	—	SB241	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
	结构管线和管材：挤制	B429	—	—	—	—	—
6066	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	—	—	—	—	—
6070	圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	冲锻件	—	MIL-A-12545	—	—	—	—
	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
6101	总线导体	B317	—	QQ-B-825	—	—	—
6105	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
6151	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771	—	4125	—	—
6201	线材：T81 状态	B398	—	—	—	—	—
	绞合导线：T81 状态	B399	—	—	—	—	—
6262	线材、圆棒和棒材：轧制和冷精轧	B211	—	QQ-A-225/10	—	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	—	—	—	—
	管材：拉制	B483	—	—	—	—	—
6351	管线：油、气输送	B345	—	—	—	—	—
	无缝管线和管材：挤制	B241	—	—	—	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
6463	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
7005	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
7049	锻件	B247	MIL-A-22771	—	4111	—	—
	挤压件	—	—	—	4157	—	—
	挤压件	—	—	—	4159	—	—
	手工(自由锻)锻件	—	—	—	4247	—	—
	锻件	—	—	—	4321	—	—
	厚板	—	—	—	4200	—	—
7050	厚板	—	—	—	4050	—	—
		—	—	—	4201	—	—
	线材、圆棒和棒材：挤制	—	—	—	4340	—	—
		—	—	—	4341	—	—
		—	—	—	4342	—	—
	锻件	B247	MIL-A-22771	—	4107	—	—
		—	—	—	4108	—	—
	模锻件	—	—	—	4333	—	—

（续）

合　金	产　品	技术指标					
		ASTM	军　事	联　邦	AMS	ASME	AWS
7050	铆钉线材和圆棒	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
包铝(Alclad)7050	薄板	—	—	—	4243	—	—
7075	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/12	4024	—	—
		—	—	QQ-A-250/24	4044	—	—
		—	—	—	4045	—	—
		—	—	—	4078	—	—
	线材、圆棒和棒材：轧制或冷精轧	B211	—	QQ-A-225/9	4122	—	—
		—	—	—	4123	—	—
		—	—	—	4124	—	—
		—	—	—	4186	—	—
		—	—	—	4187	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	4154	—	—
		—	—	—	4166	—	—
		—	—	—	4167	—	—
		—	—	—	4168	—	—
		—	—	—	4169	—	—
	管材：挤制	B241	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B210	—	WW-T-700/7	—	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771	—	—	—	—
		—	—	—	4141	—	—
		—	—	—	4126	—	—
		—	—	—	4131	—	—
		—	—	—	4147	—	—
	手工(自由锻)锻件	—	—	—	4323	—	—
	环件：轧制或锻造	—	—	—	4311	—	—
		—	—	—	4310	—	—
	冲锻件	—	MIL-A-12545	—	—	—	—
	铆钉线材	B316	—	QQ-A-430	—	—	—
包铝(Alclad)7075	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/13	—	—	—
		—	—	QQ-A-250/25	4048	—	—
		—	—	QQ-A-250/26	4049	—	—
		—	—	—	4196	—	—
		—	—	—	4197	—	—
包铝(Alclad)单面7075	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/18	4046	—	—

（续）

合金	产品	技术指标					
		ASTM	军事	联邦	AMS	ASME	AWS
包铝（Alclad）7475	薄板	—	—	—	4100	—	—
		—	—	—	4207	—	—
7175	挤压	—	—	—	4344	—	—
	锻件和锻件毛坯	B247	MIL-A-22771		4148	—	—
		—	—	—	4149	—	—
		—	—	—	4179	—	—
7178	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/14	—	—	—
		—	—	QQ-A-250/21	—	—	—
	线材、圆棒、棒材、型材和管材：挤制	B221	—	—	—	—	—
	铆钉线材	B316	—	—	—	—	—
	管材：拉制、无缝	B241	—	—	—	—	—
包铝（Alclad）7178	薄板和厚板	B209	—	QQ-A-250/15	4051	—	—
		—	—	QQ-A-250/22	—	—	—
		—	—	QQ-A-250/28	—	—	—
7475	薄板和厚板	—	—	—	4084	—	—
		—	—	—	4085	—	—
		—	—	—	4089	—	—
		—	—	—	4090	—	—
		—	—	—	4202	—	—

第6节 锻压铝合金的性能

表3.1-22 锻压铝及其铝合金的密度和相对密度

合金	密度/(lb/in³)	相对密度	合金	密度/(lb/in³)	相对密度	合金	密度/(lb/in³)	相对密度
1050	0.0975	2.705	2017	0.101	2.79	3005	0.098	2.73
1060	0.0975	2.705	2018	0.102	2.82	3105	0.098	2.72
1100	0.098	2.71	2024	0.101	2.78	4032	0.097	2.68
1145	0.0975	2.700	2025	0.101	2.81	4043	0.097	2.69
1175	0.0975	2.700	2036	0.100	2.75	4045	0.096	2.67
1200	0.098	2.70	2117	0.099	2.75	4047	0.096	2.66
1230	0.098	2.70	2124	0.100	2.78	4145	0.099	2.74
1235	0.0975	2.705	2218	0.101	2.81	4343	0.097	2.68
1345	0.0975	2.705	2219	0.103	2.84	4643	0.097	2.69
1350	0.0975	2.705	2618	0.100	2.76	5005	0.098	2.70
2011	0.102	2.83	3003	0.099	2.73	5050	0.097	2.69
2014	0.101	2.80	3004	0.098	2.72	5052	0.097	2.68

（续）

合金	密度/(lb/in³)	相对密度	合金	密度/(lb/in³)	相对密度	合金	密度/(lb/in³)	相对密度
5056	0.095	2.64	5657	0.097	2.69	6463	0.097	2.69
5083	0.096	2.66	6003	0.097	2.70	6951	0.098	2.70
5086	0.096	2.66	6005	0.097	2.70	7005	0.100	2.78
5154	0.096	2.66	6053	0.097	2.69	7008	0.100	2.78
5183	0.096	2.66	6061	0.098	2.70	7049	0.103	2.84
5252	0.096	2.67	6063	0.097	2.70	7050	0.102	2.83
5254	0.096	2.66	6066	0.098	2.72	7072	0.098	2.72
5356	0.096	2.64	6070	0.098	2.71	7075	0.101	2.81
5454	0.097	2.69	6101	0.097	2.70	7178	0.102	2.83
5456	0.096	2.66	6105	0.097	2.69	8017	0.098	2.71
5457	0.097	2.69	6151	0.098	2.71	8030	0.098	2.71
5554	0.097	2.69	6162	0.097	2.70	8176	0.098	2.71
5556	0.096	2.66	6201	0.097	2.69	8177	0.098	2.70
5652	0.097	2.67	6262	0.098	2.72			
5654	0.096	2.66	6351	0.098	2.71			

注：密度和相对密度取决于成分，并且其大部分合金的变化都是因铸造种类而异的。表3.1-22中所列的相对密度值不应作为工程要求的规定，而是用于计算单位长度的重量、单位面积的重量和覆盖面积等的典型数值。密度值是按米制推算并圆整而得的，这些值并未换算回米制。

表3.1-23 锻压铝的一般物理性质

合金	平均线膨胀系数①		近似熔化温度范围②③		状态	25℃(77℉)的热导率		20℃(68℉)的电导率，%IACS		20℃(68℉)的电阻率	
	μm/(m·℃)	μin/(in·℉)	℃	℉		W/(m·℃)	Btu·in/(ft²·h·℉)	等体积	等重量	Ω·mm²/m	Ω·圆密耳/ft
1060	23.6	13.1	645~655	1195~1215	O	234	1625	62	204	0.028	17
					H18	230	1600	61	201	0.028	17
1100	23.6	13.1	643~655	1190~1215	O	222	1540	59	194	0.030	18
					H18	218	1510	57	187	0.030	18
1350	23.75	13.2	645~655	1195~1215	所有	234	1625	62	204	0.028	17
2011	22.9	12.7	540~643④	1005~1190④	T3	151	1050	39	123	0.045	27
					T8	172	1190	45	142	0.038	23
2014	23.0	12.8	507~638⑤	945~1180⑤	O	193	1340	50	159	0.035	21
					T4	134	930	34	108	0.0515	31
					T6	154	1070	40	127	0.043	26
2017	23.6	13.1	513~640⑤	955~1185⑤	OH	193	1340	50	159	0.035	21
					T4	134	930	34	108	0.0515	31
2018	22.3	12.4	507~638④	945~1180④	T61	154	1070	40	127	0.043	26

（续）

合金	平均线膨胀系数①		近似熔化温度范围②③		状态	25℃(77℉)的热导率		20℃(68℉)的电导率，%IACS		20℃(68℉)的电阻率	
	μm/(m·℃)	μin/(in·℉)	℃	℉		W/(m·℃)	Btu·in/(ft²·h·℉)	等体积	等重量	Ω·mm²/m	Ω·圆密耳/ft
2024	23.2	12.9	500～638⑤	935～1180⑤	O	193	1340	50	160	0.035	21
					T3，T4，T361	121	840	30	96	0.058	35
					T6，T81，T861	151	1050	38	122	0.045	27
2025	22.7	12.6	520～640⑤	970～1185⑤	T6	154	1070	40	128	0.043	26
2036	23.4	13.0	555～650④	1030～1200④	T4	159	1100	41	135	0.0415	25
2117	23.75	13.2	555～650④	1030～1200④	T4	154	1070	40	130	0.043	26
2124	22.9	12.7	500～638⑤	935～1180⑤	T851	152	1055	38	122	0.045	27
2218	22.3	12.4	505～635⑤	940～1175⑤	T72	154	1070	40	126	0.043	26
2219	22.3	12.4	543～643⑤	1010～1190⑤	O	172	1190	44	138	0.040	24
					T31，T37	112	780	28	88	0.0615	37
					T6，T81，T87	121	840	30	94	0.058	35
2618	22.3	12.4	550～638	1020～1180	T6	147	1020	37	120	0.0465	28
3003	23.2	12.9	643～655	1190～1210	O	193	1340	50	163	0.035	21
					H12	163	1130	42	137	0.0415	25
					H14	159	1100	41	134	0.0415	25
					H18	154	1070	40	130	0.043	26
3004	23.9	13.3	630～655	1165～1210	所有	163	1130	42	137	0.0415	25
3105	23.6	13.1	635～655	1175～1210	所有	172	1190	45	148	0.038	23
4032	19.4	10.8	532～570⑤	990～1060⑤	O	154	1070	40	132	0.043	26
					T6	138	960	35	116	0.050	30
4043	22.1	12.3	575～632	1065～1170	O	163	1130	42	140	0.0415	25
4045	21.05	11.7	575～600	1065～1110	所有	172	1190	45	151	0.038	23
4343	21.6	12.0	577～613	1070～1135	所有	180	1250	42	158	0.0415	25
5005	23.75	13.2	632～655	1170～1210	所有	200	1390	52	172	0.033	20
5050	23.75	13.2	625～650	1155～1205	所有	193	1340	50	165	0.035	21
5052	23.75	13.2	607～650	1125～1200	所有	138	960	35	116	0.050	30
5056	24.1	13.4	568～638	1055～1180	O	117	810	29	98	0.060	36
					H38	108	750	27	91	0.063	38
5083	23.75	13.2	590～638	1095～1180	O	117	810	29	98	0.060	36
5086	23.75	13.2	585～640	1085～1185	所有	125	870	31	104	0.055	33
5154	23.9	13.3	593～643	1100～1190	所有	125	870	32	107	0.053	32
5252	23.75	13.2	607～650	1125～1200	所有	138	960	35	116	0.050	30
5254	23.9	13.3	593～643	1100～1190	所有	125	870	32	107	0.053	32

（续）

合金	平均线膨胀系数①		近似熔化温度范围②③		状态	25℃(77℉)的热导率		20℃(68℉)的电导率，%IACS		20℃(68℉)的电阻率	
	μm/(m·℃)	μin/(in·℉)	℃	℉		W/(m·℃)	Btu·in/(ft²·h·℉)	等体积	等重量	Ω·mm²/m	Ω·圆密耳/ft
5356	24.1	13.4	570~635	1060~1175	O	117	810	29	98	0.060	36
5454	23.6	13.1	600~645	1115~1195	O	134	930	34	113	0.0515	31
					H38	134	930	34	113	0.0515	31
5456	23.9	13.3	568~638	1055~1180	O	117	810	29	98	0.060	36
5457	23.75	13.2	630~655	1165~1210	所有	176	1220	46	153	0.038	23
5652	23.75	13.2	607~650	1125~1200	所有	138	960	35	116	0.050	30
5657	23.75	13.2	638~657	1180~1215	所有	205	1420	54	180	0.0315	19
6005	23.4	13.0	610~655④	1125~1210④	T1	180	1250	47	155	0.0365	22
					T5	190	1310	49	161	0.035	21
6053	23	12.8	575~650④	1070~1205④	O	172	1190	45	148	0.038	23
					T4	154	1070	40	132	0.043	26
					T6	163	1130	42	139	0.0415	25
6061	23.6	13.1	580~650④	1080~1205④	O	180	1250	47	155	0.0365	22
					T4	154	1070	40	132	0.043	26
					T6	167	1160	43	142	0.040	24
6063	23.4	13.0	615~655	1140~1210	O	218	1510	58	191	0.030	18
					T1	193	1340	50	165	0.035	21
					T5	209	1450	55	181	0.032	19
					T6，T83	200	1390	53	175	0.033	20
6066	23.2	12.9	565~645⑤	1045~1195⑤	O	154	1070	40	132	0.043	26
					T6	147	1020	37	122	0.0465	28
6070	—	—	565~650⑤	1050~1200⑤	T6	172	1190	44	145	0.040	24
6101	23.4	13.0	620~655	1150~1210	T6	218	1510	57	188	0.030	18
					T61	222	1540	59	194	0.030	18
					T63	218	1510	58	191	0.030	18
					T64	226	1570	60	198	0.028	17
					T65	218	1510	58	191	0.030	18
6105	23.4	13.0	600~650④	1110~1200④	T1	176	1220	46	151	0.038	23
					T5	193	1340	50	165	0.035	21
6151	23.2	12.9	590~650④	1090~1200④	O	205	1420	54	178	0.0315	19
					T4	163	1130	42	138	0.0415	25
					T6	172	1190	45	148	0.038	23
6201	23.4	13.0	607~655④	1125~1210④	T81	205	1420	54	180	0.0315	19

（续）

合金	平均线膨胀系数①		近似熔化温度范围②③		状态	25℃(77℉)的热导率		20℃(68℉)的电导率，%IACS		20℃(68℉)的电阻率	
	μm/(m·℃)	μin/(in·℉)	℃	℉		W/(m·℃)	Btu·in/(ft²·h·℉)	等体积	等重量	Ω·mm²/m	Ω·圆密耳/ft
6253	—	—	600～650	1100～1205	—	—	—	—	—	—	—
6262	23.4	13.0	580～650④	1080～1205④	T9	172	1190	44	145	0.040	24
6351	23.4	13.0	555～650	1030～1200	T6	176	1220	46	151	0.038	23
6463	23.4	13.0	615～655	1140～1210	T1	193	1340	50	165	0.035	21
					T5	209	1450	55	181	0.0315	19
					T6	200	1390	53	175	0.033	20
6951	23.4	13.0	615～655	1140～1210	O	213	1480	56	186	0.0315	19
					T6	198	1370	52	172	0.033	20
7049	23.4	13.0	475～635	890～1175	T73	154	1070	40	132	0.043	26
7050	24.1	13.4	490～630	910～1165	T74⑥	157	1090	41	135	0.0415	25
7072	23.6	13.1	640～655	1185～1215	O	222	1540	59	193	0.030	18
7075	23.6	13.1	475～635⑦	890～1175⑦	T6	130	900	3	105	0.0515	31
7175	23.4	13.0	475～635⑦	890～1175⑦	T74	156	1080	39	124	0.043	26
7178	23.4	13.0	475～630⑦	890～1165⑦	T6	125	870	31	98	0.055	33
7475	23.2	12.9	475～635⑦	890～1175⑦	T61，T651	138	960	35	116	0.050	30
					T76，T761	147	1020	40	132	0.043	26
					T7351	163	1130	42	139	0.0415	25
8017	23.6	13.1	645～655	1190～1215	H12，H22	—	—	59	193	0.030	18
					H212	—	—	61	200	0.028	17
8030	23.6	13.1	645～655	1190～1215	H221	230	1600	61	201	0.028	17
8176	23.6	13.1	645～655	1190～1215	H24	230	1600	61	201	0.028	17

①系数的温度范围为20～100℃(68～212℉)。　②所示熔化温度范围适用于厚度为6.35mm(1/4in)或更厚的锻压产品。③按照所示合金的一般成分。　④通过均化处理，可以完全消除共晶熔化。　⑤均化处理没有完全消除共晶熔化。　⑥虽然先前未曾注册，但文献及一些技术指标已按此状态采用代号T736。　⑦通过均化处理，可提高共晶熔化温度至10～20℃(20～40℉)，但是通常并不消除共晶熔化。

表3.1-24　锻压铝及其合金的典型力学性能

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度①	抗剪强度		疲劳极限②		弹性模量③	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件	HB	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
1060-O	70	10	30	4	43	—	19	50	7	20	3	69	10.0
1060-H12	85	12	75	11	16	—	23	55	8	30	4	69	10.0
1060-H14	95	14	90	13	12	—	26	60	9	35	5	69	10.0
1060-H16	110	16	105	15	8	—	30	70	10	45	6.5	69	10.0

（续）

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度①	抗剪强度		疲劳极限②		弹性模量③	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件	HB	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
1060-H18	130	19	125	18	6	—	35	75	11	45	6.5	69	10.0
1100-O	90	13	35	5	35	45	23	60	9	35	5	69	10.0
1100-H12	110	16	105	15	12	25	28	70	10	40	6	69	10.0
1100-H14	125	18	115	17	9	20	32	75	11	50	7	69	10.0
1100-H16	145	21	140	20	6	17	38	85	12	60	9	69	10.0
1100-H18	165	24	150	22	5	15	44	90	13	60	9	69	10.0
1350-O	85	12	30	4	—	④	—	55	8	—	—	69	10.0
1350-H12	95	14	85	12	—	—	—	60	9	—	—	69	10.0
1350-H14	110	16	95	14	—	—	—	70	10	—	—	69	10.0
1350-H16	125	18	110	16	—	—	—	75	11	—	—	69	10.0
1350-H19	185	27	165	24	—	⑤	—	105	15	50	7	69	10.0
2011-T3	380	55	295	43	—	15	95	220	32	125	18	70	10.2
2011-T8	405	59	310	45	—	12	100	240	35	125	18	70	10.2
2014-O	185	27	95	14	—	18	45	125	18	90	13	73	10.6
2014-T4，T451	425	62	290	42	—	20	105	260	38	140	20	73	10.6
2014-T6，T651	485	70	415	60	—	13	135	290	42	125	18	73	10.6
包铝(Alclad)2014-O	175	25	70	10	21	—	—	125	18	—	—	72	10.5
包铝(Alclad)2014-T3	435	63	275	40	20	—	—	255	37	—	—	72	10.5
包铝(Alclad)2014-T4，T451	420	61	255	37	22	—	—	255	37	—	—	72	10.5
包铝(Alclad)2014-T6，T651	470	68	415	60	10	—	—	285	41	—	—	72	10.5
2017-O	180	26	70	10	—	22	45	125	18	90	13	72	10.5
2017-T4，T451	425	61	255	37	22	—	—	255	37	—	—	72	10.5
2018-T61	420	61	315	46	—	12	120	270	39	115	17	74	10.8
2024-O	185	27	75	11	20	22	47	125	18	90	13	73	10.6
2024-T3	485	70	345	50	18	—	120	285	41	140	20	73	10.6
2024-T4，T351	470	68	325	47	20	19	120	285	41	140	20	73	10.6
2024-T361⑥	495	72	395	57	13	—	130	290	42	125	18	73	10.6
包铝(Alclad)2024-O	180	26	75	11	20	—	—	125	18	—	—	73	10.6
包铝(Alclad)2024-T3	450	65	310	45	18	—	—	275	40	—	—	73	10.6
包铝(Alclad)2024-T4，T351	440	64	290	42	19	—	—	275	40	—	—	73	10.6
包铝(Alclad)2024-T361⑥	460	67	365	53	11	—	—	285	41	—	—	73	10.6
包铝(Alclad)2024-T81，T851	450	65	415	60	6	—	—	275	40	—	—	73	10.6
包铝(Alclad)2024-T861⑥	485	70	455	66	6	—	—	290	42	—	—	73	10.6
2025-T6	400	58	255	37	—	19	110	240	35	125	18	71	10.4

（续）

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度[①]	抗剪强度		疲劳极限[②]		弹性模量[③]	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件	HB	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
2036-T4	340	49	195	28	24	—	—	—	—	125[⑦]	18[⑦]	71	10.3
2117-T4	295	43	165	24	—	27	70	195	28	95	14	71	10.3
2124-T851	485	70	440	64	—	8	—	—	—	—	—	73	10.6
2218-T72	330	48	255	37	—	11	95	205	30	—	—	74	10.8
2219-O	175	25	75	11	18	—	—	—	—	—	—	73	10.6
2219-T42	360	52	185	27	20	—	—	—	—	—	—	73	10.6
2219-T31，T351	360	52	250	36	17	—	—	—	—	—	—	73	10.6
2219-T37	395	57	315	46	11	—	—	—	—	—	—	73	10.6
2219-T62	415	60	290	42	10	—	—	—	—	105	15	73	10.6
2219-T81，T851	455	66	350	51	10	—	—	—	—	105	15	73	10.6
2219-T87	475	69	395	57	10	—	—	—	—	105	15	73	10.6
2618-T61	440	64	370	54	—	10	115	260	38	125	18	74	10.8
3003-O	110	16	40	6	30	40	28	75	11	50	7	69	10.0
3003-H12	130	19	125	18	10	20	35	85	12	55	8	69	10.0
3003-H14	150	22	145	21	8	16	40	95	14	60	9	69	10.0
3003-H16	180	26	170	25	5	14	47	105	15	70	10	69	10.0
3003-H18	200	29	185	27	4	10	55	110	16	70	10	69	10.0
包铝(Alclad)3003-O	110	16	40	6	30	40	—	75	11	—	—	—	—
包铝(Alclad)3003-H12	130	19	125	18	10	20	—	85	12	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3003-H14	150	22	145	21	8	16	—	95	14	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3003-H16	180	26	170	25	5	14	—	105	15	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3003-H18	200	29	185	27	4	10	—	110	16	—	—	69	10.0
3004-O	180	26	70	10	20	25	45	110	16	95	14	69	10.0
3004-H32	215	31	170	25	10	17	52	115	17	105	15	69	10.0
3004-H34	240	35	200	29	9	12	63	125	18	105	15	69	10.0
3004-H36	260	38	230	33	5	9	70	140	20	110	16	69	10.0
3004-H38	285	41	250	36	5	6	77	145	21	110	16	69	10.0
包铝(Alclad)3004-O	180	26	70	10	20	25	—	110	16	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3004-H32	215	31	170	25	10	17	—	115	17	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3004-H34	240	35	200	29	9	12	—	125	18	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3004-H36	260	38	230	33	5	9	—	140	20	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)3004-H38	285	41	250	36	5	6	—	145	21	—	—	69	10.0
3105-O	115	17	55	8	24	—	—	85	12	—	—	69	10.0
3105-H12	150	22	130	19	7	—	—	95	14	—	—	69	10.0

(续)

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度[①]	抗剪强度		疲劳极限[②]		弹性模量[③]	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件	HB	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
3105-H14	170	25	150	22	5	—	—	105	15	—	—	69	10.0
3105-H16	195	28	170	25	4	—	—	110	16	—	—	69	10.0
3105-H18	215	31	195	28	3	—	—	115	17	—	—	69	10.0
3105-H25	180	26	160	23	8	—	—	105	15	—	—	69	10.0
4032-T6	380	55	315	46	—	9	120	260	38	110	16	79	11.4
5005-O	125	18	40	6	25	—	28	75	11	—	—	69	10.0
5005-H12	140	20	130	19	10	—	—	95	14	—	—	69	10.0
5005-H14	160	23	150	22	6	—	—	95	14	—	—	69	10.0
5005-H16	180	26	170	25	5	—	—	105	15	—	—	69	10.0
5005-H18	200	29	195	28	4	—	—	110	16	—	—	69	10.0
5005-H32	140	20	115	17	11	—	36	95	14	—	—	69	10.0
5005-H34	160	23	140	20	8	—	41	95	14	—	—	69	10.0
5005-H36	180	26	165	24	6	—	46	105	15	—	—	69	10.0
5005-H38	200	29	185	27	5	—	51	110	16	—	—	69	10.0
5050-O	145	21	55	8	24	—	36	105	15	85	12	69	10.0
5050-H32	170	25	145	21	9	—	46	115	17	90	13	69	10.0
5050-H34	195	28	165	24	8	—	53	125	18	90	13	69	10.0
5050-H36	205	30	180	26	7	—	58	130	19	95	14	69	10.0
5050-H38	220	32	200	29	6	—	63	140	20	95	14	69	10.0
5052-O	195	28	90	13	25	30	47	125	18	110	16	70	10.2
5052-H32	230	33	195	28	12	18	60	140	20	115	17	70	10.2
5052-H34	260	38	215	31	10	14	68	145	21	125	18	70	10.2
5052-H36	275	40	240	35	8	10	73	160	23	130	19	70	10.2
5052-H38	290	42	255	37	7	8	77	165	24	140	20	70	10.2
5056-O	290	42	150	22	—	35	65	180	26	140	20	71	10.3
5056-H18	435	63	405	59	—	10	105	235	34	150	22	71	10.3
5056-H38	415	60	345	50	—	15	100	220	32	150	22	71	10.3
5083-O	290	42	145	21	—	22	—	170	25	—	—	71	10.3
5083-H321, H116	315	46	230	33	—	16	—	—	—	160	23	71	10.3
5086-O	260	38	115	17	22	—	—	160	23	—	—	71	10.3
5086-H32, H116	290	42	205	30	12	—	—	—	—	—	—	71	10.3
5086-H34	325	47	255	37	10	—	—	185	27	—	—	71	10.3
5086-H112	270	39	130	19	14	—	—	—	—	—	—	71	10.3
5154-O	240	35	115	17	27	—	58	150	22	115	17	70	10.2

（续）

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度[①]	抗剪强度		疲劳极限[②]		弹性模量[③]	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件	HB	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
5154-H32	270	39	205	30	15	—	67	150	22	125	18	70	10.2
5154-H34	290	42	230	33	13	—	73	165	24	130	19	70	10.2
5154-H36	310	45	250	36	12	—	78	180	26	140	20	70	10.2
5154-H38	330	48	270	39	10	—	80	195	28	145	21	70	10.2
5154-H112	240	35	115	17	25	—	63	—	—	115	17	70	10.2
5252-H25	235	34	170	25	11	—	68	145	21	—	—	69	10.0
5252-H38，H28	285	41	240	35	5	—	75	160	23	—	—	69	10.0
5254-O	240	35	115	17	27	—	58	150	22	115	17	70	10.2
5254-H32	270	39	205	30	15	—	67	150	22	125	18	70	10.2
5254-H34	290	42	230	33	13	—	73	165	24	130	19	70	10.2
5254-H36	310	45	250	36	12	—	78	180	26	140	20	70	10.2
5254-H38	330	48	270	39	10	—	80	195	28	145	21	70	10.2
5254-H112	240	35	115	17	25	—	63	—	—	115	17	70	10.2
5454-O	250	36	115	17	22	—	62	160	23	—	—	70	10.2
5454-H32	275	40	205	30	10	—	73	165	24	—	—	70	10.2
5454-H34	305	44	240	35	10	—	81	180	26	—	—	70	10.2
5454-H111	260	38	180	26	14	—	70	160	23.	—	—	70	10.2
5454-H112	250	36	125	18	18	—	62	160	23	—	—	70	10.2
5456-O	310	45	160	23	—	24	—	—	—	—	—	71	10.3
5456-H112	310	45	165	24	—	22	—	—	—	—	—	71	10.3
5456-H321，H116	350	51	255	37	—	16	90	205	30	—	—	71	10.3
5457-O	130	19	50	7	22	—	32	85	12	—	—	69	10.0
5457-H25	180	26	160	23	12	—	48	110	16	—	—	69	10.0
5457-H38，H28	205	30	185	27	6	—	55	125	18	—	—	69	10.0
5652-O	195	28	90	13	25	30	47	125	18	110	16	70	10.2
5652-H32	230	33	195	28	12	18	60	140	20	115	17	70	10.2
5652-H34	260	38	215	31	10	14	68	145	21	125	18	70	10.2
5652-H36	275	40	240	35	8	10	73	160	23	130	19	70	10.2
5652-H38	290	42	255	37	7	8	77	165	24	140	20	70	10.2
5657-H25	160	23	140	20	12	—	40	95	14	—	—	69	10.0
5657-H38，H28	195	28	165	24	7	—	50	105	15	—	—	69	10.0
6061-O	125	18	55	8	25	30	30	85	12	60	9	69	10.0
6061-T4，T451	240	35	145	21	22	25	65	165	24	95	14	69	10.0
6061-T6，T651	310	45	275	40	12	17	95	205	30	95	14	69	10.0

（续）

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度[①] HB	抗剪强度		疲劳极限[②]		弹性模量[③]	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件		MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
包铝(Alclad)6061-O	115	17	50	7	25	—	—	75	11	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)6061-T4，T451	230	33	130	19	22	—	—	150	22	—	—	69	10.0
包铝(Alclad)6061-T6，T651	290	42	255	37	12	—	—	185	27	—	—	69	10.0
6063-O	90	13	50	7	—	—	25	70	10	55	8	69	10.0
6063-T1	150	22	90	13	20	—	42	95	14	60	9	69	10.0
6063-T4	170	25	90	13	22	—	—	—	—	—	—	69	10.0
6063-T5	185	27	145	21	12	—	60	115	17	70	10	69	10.0
6063-T6	240	35	215	31	12	—	73	150	22	70	10	69	10.0
6063-T83	255	37	240	35	9	—	82	150	22	—	—	69	10.0
6063-T831	205	30	185	27	10	—	70	125	18	—	—	69	10.0
6063-T832	290	42	270	39	12	—	95	185	27	—	—	69	10.0
6066-O	150	22	85	12	—	18	43	95	14	—	—	69	10.0
6066-T4，T451	360	52	205	30	—	18	90	200	29	—	—	69	10.0
6066-T6，T651	395	57	360	52	—	12	120	235	34	110	16	69	10.0
6070-T6	380	55	350	51	10	—	—	235	34	95	14	69	10.0
6101-H111	95	14	75	11	—	—	—	—	—	—	—	69	10.0
6101-T6	220	32	195	28	15	—	71	140	20	—	—	69	10.0
6262-T9	400	58	380	55	—	10	120	240	35	90	13	69	10.0
6351-T4	250	36	150	22	20	—	—	—	—	—	—	69	10.0
6351-T6	310	45	285	41	14	—	95	200	29	90	13	69	10.0
6463-T1	150	22	90	13	20	—	42	95	14	70	10	69	10.0
6463-T5	185	27	145	21	12	—	60	115	17	70	10	69	10.0
6463-T6	240	35	215	31	12	—	74	150	22	70	10	69	10.0
7049-T73	515	75	450	65	—	12	135	305	44	—	—	72	10.4
7049-T7352	515	75	435	63	—	11	135	295	43	—	—	72	10.4
7050-T73510，T73511	495	72	435	63	—	12	—	—	—	—	—	72	10.4
7050-T7451[⑧]	525	76	470	68	—	11	—	305	44	—	—	72	10.4
7050-T7651	550	80	490	71	—	11	—	325	47	—	—	72	10.4
7075-O	230	33	105	15	17	16	60	150	22	—	—	72	10.4
7075-T6，T651	570	83	505	73	11	11	150	330	48	160	23	72	10.4
包铝(Alclad)7075-O	220	32	95	14	17	—	—	150	22	—	—	72	10.4
包铝(Alclad)7075-T6，T651	525	76	460	67	11	—	—	315	46	—	—	72	10.4
7175-T74	525	76	455	66	—	11	135	290	42	160	23	72	10.4
7178-O	230	33	105	15	15	16	—	—	—	—	—	72	10.4

（续）

合金及状态	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		硬度[①]	抗剪强度		疲劳极限[②]		弹性模量[③]	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6mm(1/16in)厚试件	1.3mm(1/2in)直径试件	HB	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
7178-T6，T651	605	88	540	78	10	11	—	—	—	—	—	72	10.4
7178-T76，T7651	570	83	505	73	—	11	—	—	—	—	—	71	10.3
包铝(Alclad)7178-O	220	32	95	14	16	—	—	—	—	—	—	72	10.4
包铝(Alclad)7178-T6，T651	560	81	490	71	10	—	—	—	—	—	—	72	10.4
7475-T61	565	82	490	71	11	—	—	—	—	—	—	70	10.2
7475-T651	585	85	510	74	—	13	—	—	—	—	—	72	10.4
7475-T7351	495	72	420	61	—	13	—	—	—	—	—	72	10.4
7475-T761	515	75	450	65	12	—	—	—	—	—	—	70	10.2
7475-T7651	530	77	460	67	—	12	—	—	—	—	—	72	10.4
包铝(Alclad)7475-T61	515	75	455	66	11	—	—	—	—	—	—	70	10.2
包铝(Alclad)7475-T761	490	71	420	61	12	—	—	—	—	—	—	70	10.2
8176-H24	115	17	95	14	15	—	—	70	10	—	—	69	10.0

注：本表所列的典型性能不予保证，因为在多数的情况下，它们为不同大小、产品形式和制造方法的平均值，故可能不能准确代表任何一种特定的产品大小。表中的数据仅作为比较合金及其状态的依据用，不应将其规定为以设计为目的的工程要求。

①500kg 载荷和 10mm 直径球。 ②使用 R. R. 莫尔型试验机和试件，按照 5×10^8 周的完全交变应力。 ③平均拉伸模量和平均压缩模量。压缩模量比拉伸模量大约 2%。 ④250mm(10in)的 1350-O 的线材，将有约近 23% 的伸长率。 ⑤250mm(10in)的 1350-H191 的线材，将有约 1.5% 的伸长率。 ⑥T361 和 T861 分别为过去的代号 T36 和 T86。 ⑦薄板试件按 10^7 周进行弯曲型试验。 ⑧T7451 虽然以前未曾注册，但是它曾以 T73651 在文献和技术指标中出现。

表 3.1-25 温度对锻压铝和铝合金抗拉强度的影响

合金及其状态	抗拉强度[①]/MPa(ksi)									
	-195℃(-320℉)	-80℃(-112℉)	-30℃(-18℉)	24℃(75℉)	100℃(212℉)	150℃(300℉)	205℃(400℉)	260℃(500℉)	315℃(600℉)	370℃(700℉)
1100-O	172(25)	103(15)	97(14)	90(13)	70(10)	55(8)	40(6)	28(4)	20(2.9)	14(2.1)
1100-H14	207(30)	138(20)	130(19)	125(18)	110(16)	97(14)	70(10)	28(4)	20(2.9)	14(2.1)
1100-H18	235(34)	180(26)	172(25)	165(24)	145(21)	125(18)	40(6)	28(4)	20(2.9)	14(2.1)
2011-T3	—	—	—	380(55)	325(47)	193(28)	110(16)	45(6.5)	21(3.1)	16(2.3)
2014-T6，T651	580(84)	510(74)	495(72)	483(70)	435(63)	275(40)	110(16)	66(9.5)	45(6.5)	30(4.3)
2017-T4，T451	550(80)	448(65)	440(64)	427(62)	393(57)	275(40)	110(16)	62(9)	40(6)	30(4.3)
2024-T3(薄板)	585(85)	503(73)	495(72)	483(70)	455(66)	380(55)	185(27)	75(11)	52(7.5)	35(5)
2024-T4，T351(厚板)	580(84)	490(71)	475(69)	470(68)	435(63)	310(45)	180(26)	75(11)	52(7.5)	35(5)
2024-T6，T651	580(84)	495(72)	483(70)	475(69)	448(65)	310(45)	180(26)	75(11)	52(7.5)	35(5)
2024-T81，T851	585(85)	510(74)	503(73)	483(70)	455(66)	380(55)	185(27)	75(11)	52(7.5)	35(5)
2024-T861	635(92)	558(81)	538(78)	517(75)	483(70)	372(54)	145(21)	75(11)	52(7.5)	35(5)
2117-T4	385(56)	310(45)	303(44)	295(43)	248(36)	207(30)	110(16)	52(7.5)	32(4.7)	20(2.9)
2124-T851	593(86)	525(76)	503(73)	483(70)	455(66)	372(54)	185(27)	75(11)	52(7.5)	38(5.5)

（续）

合金及其状态	抗拉强度①/MPa(ksi)									
	-195℃ (-320℉)	-80℃ (-112℉)	-30℃ (-18℉)	24℃ (75℉)	100℃ (212℉)	150℃ (300℉)	205℃ (400℉)	260℃ (500℉)	315℃ (600℉)	370℃ (700℉)
2218-T61	495(72)	420(61)	407(59)	407(59)	385(56)	283(41)	152(22)	70(10)	38(5.5)	28(4)
2219-T62	503(73)	435(63)	415(60)	400(58)	372(54)	310(45)	235(34)	185(27)	70(10)	30(4.4)
2219-T81，T851	572(83)	490(71)	475(69)	455(66)	415(60)	338(49)	248(36)	200(29)	48(7)	30(4.4)
2618-T61	538(78)	462(67)	440(64)	440(64)	427(62)	345(50)	220(32)	90(13)	52(7.5)	35(5)
3003-O	228(33)	138(20)	117(17)	110(16)	90(13)	75(11)	59(8.5)	40(6)	28(4)	19(2.8)
3003-H14	240(35)	165(24)	152(22)	152(22)	145(21)	125(18)	97(14)	52(7.5)	28(4)	19(2.8)
3003-H18	283(41)	220(32)	207(30)	200(29)	180(26)	160(23)	97(14)	52(7.5)	28(4)	19(2.8)
3004-O	290(42)	193(28)	180(26)	180(26)	180(26)	152(22)	97(14)	70(10)	52(7.5)	35(5)
3004-H34	360(52)	262(38)	248(36)	240(35)	235(34)	193(28)	145(21)	97(14)	52(7.5)	35(5)
3004-H38	400(58)	303(44)	290(42)	283(41)	275(40)	215(31)	152(22)	83(12)	52(7.5)	35(5)
4032-T6	455(66)	400(58)	385(56)	380(55)	345(50)	255(37)	90(13)	55(8)	35(5)	23(3.4)
5050-O	255(37)	152(22)	145(21)	145(21)	145(21)	130(19)	97(14)	62(9)	40(6)	27(3.9)
5050-H34	303(44)	207(30)	193(28)	193(28)	193(28)	172(25)	97(14)	62(9)	40(6)	27(3.9)
5050-H38	317(46)	235(34)	220(32)	220(32)	215(31)	185(27)	97(14)	62(9)	40(6)	27(3.9)
5052-O	303(44)	200(29)	193(28)	193(28)	193(28)	160(23)	117(17)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5052-H34	380(55)	275(40)	262(38)	262(38)	262(38)	207(30)	165(24)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5052-H38	415(60)	303(44)	290(42)	290(42)	275(40)	235(34)	172(25)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5083-O	407(59)	295(43)	290(42)	290(42)	275(40)	215(31)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5086-O	380(55)	270(39)	262(38)	262(38)	262(38)	200(29)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5154-O	360(52)	248(36)	240(35)	240(35)	240(35)	200(29)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5254-O	360(52)	248(36)	240(35)	240(35)	240(35)	200(29)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5454-O	372(54)	255(37)	248(36)	248(36)	248(36)	200(29)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5454-H32	407(59)	290(42)	283(41)	275(40)	270(39)	220(32)	172(25)	117(17)	75(11)	40(6)
5454-H34	435(63)	317(46)	303(44)	303(44)	295(43)	235(34)	180(26)	117(17)	75(11)	40(6)
5456-O	427(62)	317(46)	310(45)	310(45)	290(42)	215(31)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5652-O	303(44)	200(29)	193(28)	193(28)	193(28)	160(23)	117(17)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5652-H34	380(55)	275(40)	262(38)	262(38)	262(38)	207(30)	165(24)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5456-O	427(62)	317(46)	310(45)	310(45)	290(42)	215(31)	152(22)	117(17)	75(11)	40(6)
5652-O	303(44)	200(29)	193(28)	193(28)	193(28)	160(23)	117(17)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5652-H34	380(55)	275(40)	262(38)	262(38)	262(38)	207(30)	165(24)	83(12)	52(7.5)	35(5)
5652-H38	415(60)	303(44)	290(42)	290(42)	275(40)	235(34)	172(25)	83(12)	52(7.5)	35(5)
6053-T6，T651	—	—	—	255(37)	220(32)	172(25)	90(13)	38(5.5)	28(4)	20(2.9)
6061-T6，T651	415(60)	338(49)	325(47)	310(45)	290(42)	235(34)	130(19)	52(7.5)	32(4.6)	21(3)
6063-T1	235(34)	180(26)	165(24)	152(22)	152(22)	145(21)	62(9)	31(4.5)	22(3.2)	16(2.3)
6063-T5	255(37)	200(29)	193(28)	185(27)	165(24)	138(20)	62(9)	31(4.5)	22(3.2)	16(2.3)
6063-T6	325(47)	262(38)	248(36)	240(35)	215(31)	145(21)	62(9)	31(4.5)	22(3.2)	16(2.3)
6101-T6	295(43)	248(36)	235(34)	220(32)	193(28)	145(21)	70(10)	33(4.8)	21(3)	17(2.5)
6151-T6	393(57)	345(50)	338(49)	330(48)	295(43)	193(28)	97(14)	45(6.5)	33(5)	28(4)
6262-T651	415(60)	338(49)	325(47)	310(45)	290(42)	235(34)	—	—	—	—

（续）

合金及其状态	抗拉强度①/MPa(ksi)									
	-195℃(-320℉)	-80℃(-112℉)	-30℃(-18℉)	24℃(75℉)	100℃(212℉)	150℃(300℉)	205℃(400℉)	260℃(500℉)	315℃(600℉)	370℃(700℉)
6262-T9	510(74)	427(62)	415(60)	400(58)	365(53)	262(38)	103(15)	59(8.5)	32(4.6)	21(3)
7075-T6，T651	703(102)	620(90)	593(86)	572(83)	483(70)	215(31)	110(16)	75(11)	55(8)	40(6)
7075-T73，T7351	635(92)	545(79)	525(76)	503(73)	435(63)	215(31)	110(16)	75(11)	55(8)	40(6)
7178-T6，T651	730(106)	648(94)	627(91)	607(88)	503(73)	215(31)	103(15)	75(11)	59(8.5)	45(6.5)
7178-T76，T7651	730(106)	627(91)	607(88)	572(83)	475(69)	215(31)	103(15)	75(11)	59(8.5)	45(6.5)

① 这些数据仅出自有限的试验，并代表在其试验温度下暴露1000h无载试验的最低强度，以34MPa/min(5000psi/min)的应力作用至屈服强度，然后以每分钟0.05mm/mm的应变率至失效。在某些温度和时间的条件下，热量会对一些合金的某些其他性能产生负面影响。

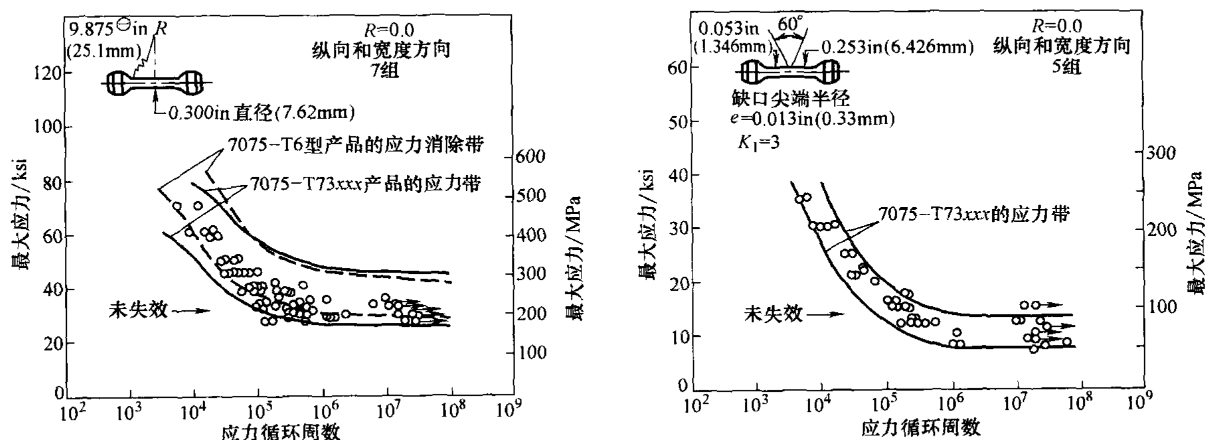


图3.1-25　7050-T7451厚板的光滑和带槽口试件的轴向应力疲劳试验数据，厚度为1～6in(25～152mm)。显示了与7075锻造产品以T6和T73xx状态的数据带间的关系

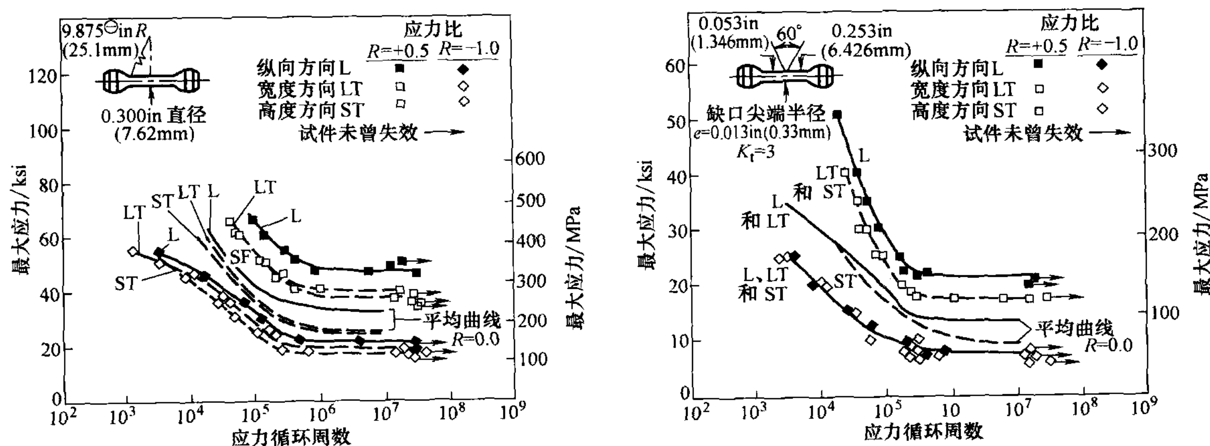


图3.1-26　7050-T7452手工锻件的光滑和带槽口试件的轴向应力疲劳试验，4½in×22in×84in(144mm×559mm×2133mm)

㊀ 原书中数据疑有误，应改为0.988in。——译者注。

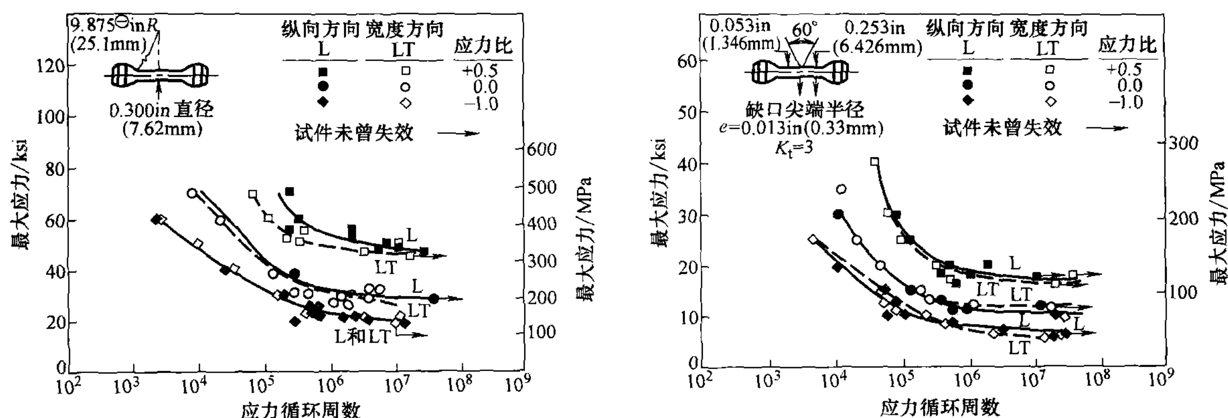


图3.1-27　7050-T7651 挤压型材的光滑和带槽口试件的轴向应力疲劳试验，厚度为1.161in(29.5mm)

表3.1-26　温度对锻压铝和铝合金屈服强度的影响

合金及其状态	0.2%条件屈服强度①/MPa(ksi)									
	−195℃(−320℉)	−80℃(−112℉)	−30℃(−18℉)	24℃(75℉)	100℃(212℉)	150℃(300℉)	205℃(400℉)	260℃(500℉)	315℃(600℉)	370℃(700℉)
1100-O	40(6)	38(5.5)	35(5)	35(5)	32(4.6)	29(4.2)	24(3.5)	18(2.6)	14(2)	11(1.6)
1100-H14	138(20)	125(18)	117(17)	117(17)	103(15)	83(12)	52(7.5)	18(2.6)	14(2)	11(1.6)
1100-H18	180(26)	160(23)	160(23)	152(22)	130(19)	97(14)	24(3.5)	18(2.6)	14(2)	11(1.6)
2011-T3	—	—	—	295(43)	235(34)	130(19)	75(11)	26(3.8)	12(1.8)	10(1.4)
2014-T6，T651	495(72)	448(65)	427(62)	415(60)	393(57)	240(35)	90(13)	52(7.5)	35(5)	24(3.5)
2017-T4，T451	365(53)	290(42)	283(41)	275(40)	270(39)	207(30)	90(13)	52(7.5)	35(5)	24(3.5)
2024-T3(薄板)	427(62)	360(52)	352(51)	345(50)	330(48)	310(45)	138(20)	62(9)	40(6)	28(4)
2024-T4，T351(厚板)	420(61)	338(49)	325(47)	325(47)	310(45)	248(36)	130(19)	62(9)	40(6)	28(4)
2024-T6，T651	470(68)	407(59)	400(58)	393(57)	372(54)	248(36)	130(19)	62(9)	40(6)	28(4)
2024-T81，T851	538(78)	475(69)	470(68)	448(65)	427(62)	338(49)	138(20)	62(9)	40(6)	28(4)
2024-T861	585(85)	530(77)	510(74)	490(71)	462(67)	330(48)	117(17)	62(9)	40(6)	28(4)
2117-T4	228(33)	172(25)	165(24)	165(24)	145(21)	117(17)	83(12)	38(5.5)	23(3.3)	14(2)
2124-T851	545(79)	490(71)	470(68)	440(64)	420(61)	338(49)	138(20)	55(8)	40(6)	28(4.1)
2218-T61	360(52)	310(45)	303(44)	303(44)	290(42)	240(35)	110(16)	40(6)	20(3)	17(2.5)
2219-T62	338(49)	303(44)	290(42)	275(40)	255(37)	228(33)	172(25)	138(20)	55(8)	26(3.7)
2219-T81，T851	420(61)	372(54)	360(52)	345(50)	325(47)	275(40)	200(29)	160(23)	40(6)	26(3.7)
2618-T61	420(61)	380(55)	372(54)	372(54)	372(54)	303(44)	180(26)	62(9)	31(4.5)	24(3.5)
3003-O	59(8.5)	48(7)	45(6.5)	40(6)	38(5.5)	35(5)	30(4.3)	23(3.4)	17(2.4)	12(1.8)
3003-H14	172(25)	152(22)	145(21)	145(21)	130(19)	110(16)	62(9)	28(4)	17(2.4)	12(1.8)
3003-H18	228(33)	200(29)	193(28)	185(27)	145(21)	110(16)	62(9)	28(4)	17(2.4)	12(1.8)
3004-O	90(13)	75(11)	70(10)	70(10)	70(10)	70(10)	66(9.5)	52(7.5)	33(5)	20(3)
3004-H34	235(34)	207(30)	200(29)	200(29)	200(29)	172(25)	103(15)	52(7.5)	35(5)	20(3)

⊖ 原书中数据疑有误，应改为0.988in。——译者注。

（续）

合金及其状态	0.2%条件屈服强度①/MPa(ksi)									
	-195℃(-320℉)	-80℃(-112℉)	-30℃(-18℉)	24℃(75℉)	100℃(212℉)	150℃(300℉)	205℃(400℉)	260℃(500℉)	315℃(600℉)	370℃(700℉)
3004-H38	295(43)	262(38)	248(36)	248(36)	248(36)	185(27)	103(15)	52(7.5)	35(5)	20(3)
4032-T6	330(48)	317(46)	317(46)	317(46)	303(44)	228(33)	62(9)	38(5.5)	22(3.2)	14(2)
5050-O	70(10)	59(8.5)	55(8)	55(8)	55(8)	55(8)	52(7.5)	40(6)	29(4.2)	18(2.6)
5050-H34	207(30)	172(25)	165(24)	165(24)	165(24)	152(22)	52(7.5)	40(6)	29(4.2)	18(2.6)
5050-H38	248(36)	207(30)	200(29)	200(29)	200(29)	172(25)	52(7.5)	40(6)	29(4.2)	18(2.6)
5052-O	110(16)	90(13)	90(13)	90(13)	90(13)	90(13)	75(11)	52(7.5)	38(5.5)	21(3.1)
5052-H34	248(36)	220(32)	215(31)	215(31)	215(31)	185(27)	103(15)	52(7.5)	38(5.5)	21(3.1)
5052-H38	303(44)	262(38)	255(37)	255(37)	248(36)	193(28)	103(15)	52(7.5)	38(5.5)	21(3.1)
5083-O	165(24)	145(21)	145(21)	145(21)	145(21)	130(19)	117(17)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5086-O	130(19)	117(17)	117(17)	117(17)	117(17)	110(16)	103(15)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5154-O	130(19)	117(17)	117(17)	117(17)	117(17)	110(16)	103(15)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5254-O	130(19)	117(17)	117(17)	117(17)	117(17)	110(16)	103(15)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5454-O	130(19)	117(17)	117(17)	117(17)	117(17)	110(16)	103(15)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5454-H32	248(36)	215(31)	207(30)	207(30)	200(29)	180(26)	130(19)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5454-H34	283(41)	248(36)	240(35)	240(35)	235(34)	193(28)	130(19)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5456-O	180(26)	160(23)	160(23)	160(23)	152(22)	138(20)	117(17)	75(11)	52(7.5)	29(4.2)
5652-O	110(16)	90(13)	90(13)	90(13)	90(13)	90(13)	75(11)	52(7.5)	38(5.5)	21(3.1)
5652-H34	248(36)	220(32)	215(31)	215(31)	215(31)	185(27)	103(15)	52(7.5)	38(5.5)	21(3.1)
5652-H38	303(44)	262(38)	255(37)	255(37)	248(36)	193(28)	103(15)	52(7.5)	38(5.5)	21(3.1)
6053-T6，T651	—	—	—	220(32)	193(28)	165(24)	83(12)	28(4)	19(2.7)	14(2)
6061-T6，T651	325(47)	290(42)	283(41)	275(40)	262(38)	215(31)	103(15)	35(5)	19(2.7)	12(1.8)
6063-T1	110(16)	103(15)	97(14)	90(13)	97(14)	103(15)	45(6.5)	24(3.5)	17(2.5)	14(2)
6063-T5	165(24)	152(22)	152(22)	145(21)	138(20)	125(18)	45(6.5)	24(3.5)	17(2.5)	14(2)
6063-T6	248(36)	228(33)	220(32)	215(31)	193(28)	138(20)	45(6.5)	24(3.5)	17(2.5)	14(2)
6101-T6	228(33)	207(30)	200(29)	193(28)	172(25)	130(19)	48(7)	23(3.3)	16(2.3)	12(1.8)
6151-T6	345(50)	317(46)	310(45)	295(43)	275(40)	185(27)	83(12)	35(5)	27(3.9)	22(3.2)
6262-T651	325(47)	290(42)	283(41)	275(40)	262(38)	215(31)	—	—	—	—
6262-T9	462(67)	400(58)	385(56)	380(55)	360(52)	255(37)	90(13)	40(6)	19(2.7)	12(1.8)
7075-T6，T651	635(92)	545(79)	517(75)	503(73)	448(65)	185(27)	90(13)	62(9)	45(6.5)	32(4.6)
7075-T73，T7351	495(72)	462(67)	448(6.5)	435(63)	400(58)	185(27)	90(13)	62(9)	45(6.5)	32(4.6)
7178-T6，T651	648(94)	580(84)	558(81)	538(78)	470(68)	185(27)	83(12)	62(9)	48(7)	35(5.5)
7178-T76，T7651	615(89)	538(78)	525(76)	503(73)	440(64)	185(27)	83(12)	62(9)	48(7)	38(5.5)

①试验条件的规定同表3.1-25注。

表 3.1-27 温度对锻压铝和铝合金伸长率的影响

合金及其状态	50mm(2in)长的伸长率(%)									
	-195℃ (-320℉)	-80℃ (-112℉)	-30℃ (-18℉)	24℃ (75℉)	100℃ (212℉)	150℃ (300℉)	205℃ (400℉)	260℃ (500℉)	315℃ (600℉)	370℃ (700℉)
1100-O	50	43	40	40	45	55	65	75	80	85
1100-H14	45	24	20	20	20	23	26	75	80	85
1100-H18	30	16	15	15	15	20	65	75	80	85
2011-T3	—	—	—	15	16	25	35	45	90	125
2014-T6, T651	14	13	13	13	15	20	28	52	65	72
2017-T4, T451	28	24	23	22	18	15	35	45	65	70
2024-T3(薄板)	18	17	17	17	16	11	23	55	75	100
2024-T4, T351(厚板)	19	19	19	19	19	17	27	55	75	100
2024-T6, T651	11	10	10	10	10	17	27	55	75	100
2024-T81, T851	8	7	7	7	8	11	23	55	75	100
2024-T861	5	5	5	5	6	11	28	55	75	100
2117-T4	30	29	28	27	16	20	35	55	80	110
2124-T851	9	8	8	9	9	13	28	60	75	100
2218-T61	15	14	13	13	15	17	30	70	85	100
2219-T62	16	13	12	12	14	17	20	21	40	75
2219-T81, T851	15	13	12	12	15	17	20	21	55	75
2618-T61	12	11	10	10	10	14	24	50	80	120
3003-O	46	42	41	40	43	47	60	65	70	70
3003-H14	30	18	16	16	16	16	20	60	70	70
3003-H18	23	11	10	10	10	11	18	60	70	70
3004-O	38	30	26	25	25	35	55	70	80	90
3004-H34	26	16	13	12	13	22	35	55	80	90
3004-H38	20	10	7	6	7	15	30	50	80	90
4032-T6	11	10	9	9	9	9	30	50	70	90
5052-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5052-H34	28	21	18	16	18	27	45	80	110	130
5052-H38	25	18	15	14	16	24	45	80	110	130
5083-O	36	30	27	25	36	50	60	80	110	130
5086-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5154-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5254-O	46	35	32	30	36	50	60	80	110	130
5454-O	39	30	27	25	31	50	60	80	110	130
5454-H32	32	23	20	18	20	37	45	80	110	130
5454-H34	30	21	18	16	18	32	45	80	110	130
5456-O	32	25	22	20	31	50	60	80	110	130

（续）

合金及其状态	50mm(2in)长的伸长率(%)									
	-195℃ (-320°F)	-80℃ (-112°F)	-30℃ (-18°F)	24℃ (75°F)	100℃ (212°F)	150℃ (300°F)	205℃ (400°F)	260℃ (500°F)	315℃ (600°F)	370℃ (700°F)
5652-O	46	35	32	30	30	50	60	80	110	130
5652-H34	28	21	18	16	18	27	45	80	110	130
5652-H38	25	18	15	14	16	24	45	80	110	130
6053-T6，T651	—	—	—	13	13	13	25	70	80	90
6061-T6，T651	22	18	17	17	18	20	28	60	85	95
6063-T1	44	36	34	33	18	20	40	75	80	105
6063-T5	28	24	23	22	18	20	40	75	80	105
6063-T6	24	20	19	18	15	20	40	75	80	105
6101-T6	24	20	19	19	20	20	40	80	100	105
6151-T6	20	17	17	17	17	20	30	50	43	35
6262-T651	22	18	17	17	18	20	—	—	—	—
6262-T9	14	10	10	10	10	14	34	48	85	95
7075-T6，T651	9	11	11	11	14	30	55	65	70	70
7075-T73，T7351	14	14	13	13	15	30	55	65	70	70
7178-T6，T651	5	8	9	11	14	40	70	76	80	80
7178-T76，T7651	10	10	10	11	17	40	70	76	80	80

注：试验条件的规定同表3.1-25注。

表3.1-28　非热处理铝合金薄板和厚板的力学性能极限值

合金及其状态	规定厚度[①]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[③] (%)
			最小		最大		最小[②]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
1060-O	0.15～0.48	0.006～0.019	55	8.0	97	14.0	17	2.5	—	—	15
	0.51～1.27	0.020～0.050	55	8.0	97	14.0	17	2.5	—	—	22
	1.30～76.20	0.051～3.000	55	8.0	97	14.0	17	2.5	—	—	25
1060-H12[④]	0.43～1.27	0.017～0.050	76	11.0	110	16.0	62	9.0	—	—	6
	1.30～50.80	0.051～2.000	76	11.0	110	16.0	62	9.0	—	—	12
1060-H14[④]	0.23～0.48	0.009～0.019	83	12.0	117	17.0	69	10.0	—	—	1
	0.51～1.27	0.020～0.050	83	12.0	117	17.0	69	10.0	—	—	5
	1.30～25.40	0.051～1.000	83	12.0	117	17.0	69	10.0	—	—	10
1060-H16[④]	0.15～0.48	0.006～0.019	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	1
	0.51～1.27	0.020～0.050	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	4
	1.30～4.11	0.051～0.162	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	5
1060-H18[④]	0.15～0.48	0.006～0.019	110	16.0	—	—	83	12.0	—	—	1
	0.51～1.27	0.020～0.050	110	16.0	—	—	83	12.0	—	—	3
	1.30～3.25	0.051～0.128	110	16.0	—	—	83	12.0	—	—	4

（续）

合金及其状态	规定厚度①		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率③（%）
			最小		最大		最小②		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
1060-H112	6.35～12.67	0.250～0.499	76	11.0	—	—	—	—	—	—	10
	12.70～25.40	0.500～1.000	69	10.0	—	—	—	—	—	—	20
	25.42～76.20	1.001～3.000	62	9.0	—	—	—	—	—	—	25
1100-O	0.15～0.48	0.006～0.019	76	11.0	107	15.5	24	3.5	—	—	15
	0.51～0.79	0.020～0.031	76	11.0	107	15.5	24	3.5	—	—	20
	0.81～1.27	0.032～0.050	76	11.0	107	15.5	24	3.5	—	—	25
	1.30～6.32	0.051～0.249	76	11.0	107	15.5	24	3.5	—	—	30
	6.35～76.20	0.250～3.000	76	11.0	107	15.5	24	3.5	—	—	28
1100-H12④	0.43～0.48	0.017～0.019	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	3
	0.51～0.79	0.020～0.031	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	4
	0.81～1.27	0.032～0.050	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	6
	1.30～2.87	0.051～0.113	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	8
	2.90～12.67	0.114～0.499	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	9
	12.70～50.80	0.500～2.000	97	14.0	131	19.0	76	11.0	—	—	12
1100-H14④	0.23～0.30	0.009～0.012	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	1
	0.33～0.48	0.013～0.019	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	4
	1.30～2.87	0.051～0.113	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	5
	2.90～12.67	0.114～0.499	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	6
	12.70～25.40	0.500～1.000	110	16.0	145	21.0	97	14.0	—	—	10
1100-H16④	0.15～0.48	0.006～0.019	131	19.0	165	24.0	117	17.0	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	131	19.0	165	24.0	117	17.0	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	131	19.0	165	24.0	117	17.0	—	—	3
	1.30～4.11	0.051～0.162	131	19.0	165	24.0	117	17.0	—	—	4
1100-H18	0.15～0.48	0.006～0.019	152	22.0	—	—	—	—	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	152	22.0	—	—	—	—	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	152	22.0	—	—	—	—	—	—	3
	1.30～3.25	0.051～0.128	152	22.0	—	—	—	—	—	—	4
1100-H112	6.35～12.67	0.250～0.499	90	13.0	—	—	48	7.0	—	—	9
	12.70～50.80	0.500～2.000	83	12.0	—	—	34	5.0	—	—	14
	50.83～76.20	2.001～3.000	79	11.5	—	—	28	4.0	—	—	20
1350-O	0.15～0.48	0.006～0.019	55	8.0	97	14.0	—	—	—	—	15
	0.51～0.79	0.020～0.031	55	8.0	97	14.0	—	—	—	—	20
	0.81～1.27	0.032～0.050	55	8.0	97	14.0	—	—	—	—	25

（续）

合金及其状态	规定厚度[1]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[3]（%）
			最小		最大		最小[2]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
1350-O	1.29～6.32	0.051～0.249	55	8.0	97	14.0	—	—	—	—	30
	6.35～76.20	0.250～3.000	55	8.0	97	14.0	—	—	—	—	28
1350-H12	0.43～0.48	0.017～0.019	83	12.0	117	17.0	—	—	—	—	3
	0.51～0.79	0.020～0.031	83	12.0	117	17.0	—	—	—	—	4
	0.81～1.27	0.032～0.050	83	12.0	117	17.0	—	—	—	—	6
	1.29～2.87	0.051～0.113	83	12.0	117	17.0	—	—	—	—	8
	2.90～12.67	0.114～0.499	83	12.0	117	17.0	—	—	—	—	9
	12.70～50.80	0.500～2.000	83	12.0	117	17.0	—	—	—	—	12
1350-H14	0.23～0.30	0.009～0.012	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	1
	0.33～0.48	0.013～0.019	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	4
	1.29～2.87	0.051～0.113	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	5
	2.90～12.67	0.114～0.499	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	6
	12.70～25.40	0.500～1.000	97	14.0	131	19.0	—	—	—	—	10
1350-H16	0.15～0.48	0.006～0.019	110	16.0	145	21.0	—	—	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	110	16.0	145	21.0	—	—	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	110	16.0	145	21.0	—	—	—	—	3
	1.29～4.11	0.051～0.162	110	16.0	145	21.0	—	—	—	—	4
1350-H18	0.15～0.48	0.006～0.019	124	18.0	—	—	—	—	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	124	18.0	—	—	—	—	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	124	18.0	—	—	—	—	—	—	3
	1.29～3.25	0.051～0.128	124	18.0	—	—	—	—	—	—	4
1350-H112	6.35～12.67	0.250～0.499	76	11.0	—	—	—	—	—	—	10
	12.70～25.40	0.500～1.000	69	10.0	—	—	—	—	—	—	16
	25.42～38.1	1.001～1.500	62	9.0	—	—	—	—	—	—	22
3003-O	0.15～0.18	0.006～0.007	97	14.0	131	19.0	34	5.0	—	—	14
	0.20～0.30	0.008～0.012	97	14.0	131	19.0	34	5.0	—	—	18
	0.33～0.79	0.013～0.031	97	14.0	131	19.0	34	5.0	—	—	20
	0.81～1.27	0.032～0.050	97	14.0	131	19.0	34	5.0	—	—	23
	1.30～6.32	0.051～0.249	97	14.0	131	19.0	34	5.0	—	—	25
	6.35～76.20	0.250～3.000	97	14.0	131	19.0	34	5.0	—	—	23
3003-H12[4]	0.43～0.48	0.017～0.019	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	3
	0.51～0.79	0.020～0.031	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	4
	0.81～1.27	0.032～0.050	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	5

（续）

合金及其状态	规定厚度[1]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[3]
			最小		最大		最小[2]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)
3003-H12[4]	1.30～2.87	0.051～0.113	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	6
	2.90～4.09	0.114～0.161	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	7
	4.11～6.32	0.162～0.249	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	8
	6.35～12.67	0.250～0.499	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	9
	12.70～50.80	0.500～2.000	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	10
3003-H14[4]	0.23～0.30	0.009～0.012	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	1
	0.33～0.48	0.013～0.019	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	4
	1.30～2.87	0.051～0.113	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	5
	2.90～4.09	0.114～0.161	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	6
	4.11～6.32	0.162～0.249	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	7
	6.35～12.67	0.250～0.499	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	8
	12.70～25.40	0.500～1.000	138	20.0	179	26.0	117	17.0	—	—	10
3003-H16[4]	0.15～0.48	0.006～0.019	165	24.0	207	30.0	145	21.0	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	165	24.0	207	30.0	145	21.0	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	165	24.0	207	30.0	145	21.0	—	—	3
	1.30～4.11	0.051～0.162	165	24.0	207	30.0	145	21.0	—	—	4
3003-H18[4]	0.15～0.48	0.006～0.019	186	27.0	—	—	165	24.0	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	186	27.0	—	—	165	24.0	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	186	27.0	—	—	165	24.0	—	—	3
	1.30～3.25	0.051～0.128	186	27.0	—	—	165	24.0	—	—	4
3003-H112	6.35～12.67	0.250～0.499	117	17.0	—	—	69	10.0	—	—	8
	12.70～50.80	0.500～2.000	103	15.0	—	—	41	6.0	—	—	12
	50.83～76.20	2.001～3.000	100	14.5	—	—	41	6.0	—	—	18
3004-O	0.15～0.18	0.006～0.007	152	22.0	200	29.0	59	8.5	—	—	—
	0.20～0.48	0.008～0.019	152	22.0	200	29.0	59	8.5	—	—	10
	0.51～0.79	0.020～0.031	152	22.0	200	29.0	59	8.5	—	—	14
	0.81～1.27	0.032～0.050	152	22.0	200	29.0	59	8.5	—	—	16
	1.30～6.32	0.051～0.249	152	22.0	200	29.0	59	8.5	—	—	18
	6.35～76.20	0.250～3.000	152	22.0	200	29.0	59	8.5	—	—	16
3004-H32[4]	0.43～0.48	0.017～0.019	193	28.0	241	35.0	145	21.0	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	193	28.0	241	35.0	145	21.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	193	28.0	241	35.0	145	21.0	—	—	4
	1.30～2.87	0.051～0.113	193	28.0	241	35.0	145	21.0	—	—	5
	2.90～50.80	0.114～2.000	193	28.0	241	35.0	145	21.0	—	—	6

（续）

合金及其状态	规定厚度[①]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[③]（%）
			最小		最大		最小[②]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
3004-H34[④]	0.23～0.48	0.009～0.019	221	32.0	262	38.0	172	25.0	—	—	1
	0.51～1.27	0.020～0.050	221	32.0	262	38.0	172	25.0	—	—	3
	1.30～2.87	0.051～0.113	221	32.0	262	38.0	172	25.0	—	—	4
	2.90～25.40	0.114～1.000	221	32.0	262	38.0	172	25.0	—	—	5
3004-H36[④]	0.15～0.18	0.006～0.007	241	35.0	283	41.0	193	28.0	—	—	—
	0.20～0.48	0.008～0.019	241	35.0	283	41.0	193	28.0	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	241	35.0	283	41.0	193	28.0	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	241	35.0	283	41.0	193	28.0	—	—	3
	1.30～4.11	0.051～0.162	241	35.0	283	41.0	193	28.0	—	—	4
3004-H38[④]	0.15～0.18	0.006～0.007	262	38.0	—	—	214	31.0	—	—	—
	0.20～0.48	0.008～0.019	262	38.0	—	—	214	31.0	—	—	1
	0.51～0.79	0.020～0.031	262	38.0	—	—	214	31.0	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	262	38.0	—	—	2.4	31.0	—	—	3
	1.30～3.25	0.051～0.128	262	38.0	—	—	214	31.0	—	—	4
3004-H112	6.35～76.20	0.250～3.000	159	23.0	—	—	62	9.0	—	—	7
3005-O	0.15～0.18	0.006～0.007	117	17.0	165	24.0	45	6.5	—	—	10
	0.20～0.30	0.008～0.012	117	17.0	165	24.0	45	6.5	—	—	12
	0.33～0.48	0.013～0.019	117	17.0	165	24.0	45	6.5	—	—	14
	0.51～0.79	0.020～0.031	117	17.0	165	24.0	45	6.5	—	—	16
	0.81～1.27	0.032～0.050	117	17.0	165	24.0	45	6.5	—	—	18
	1.29～6.32	0.051～0.249	117	17.0	165	24.0	45	6.5	—	—	20
3005-H12	0.43～0.48	0.017～0.019	138	20.0	186	27.0	17[⊖]	17.0	—	—	1
	0.51～1.27	0.020～0.050	138	20.0	186	27.0	117	17.0	—	—	2
	1.29～2.87	0.051～0.113	138	20.0	186	27.0	117	17.0	—	—	3
	2.90～4.09	0.114～0.161	138	20.0	186	27.0	117	17.0	—	—	4
	4.11～6.32	0.162～0.249	138	20.0	186	27.0	117	17.0	—	—	5
3005-H14	0.23～0.79	0.009～0.031	165	24.0	214	31.0	145	21.0	—	—	1
	0.81～1.27	0.032～0.050	165	24.0	214	31.0	145	21.0	—	—	2
	1.29～2.87	0.051～0.113	165	24.0	214	31.0	145	21.0	—	—	3
	2.90～6.32	0.114～0.249	165	24.0	214	31.0	145	21.0	—	—	4
3005-H16	0.15～0.79	0.006～0.031	193	28.0	241	35.0	172	25.0	—	—	1
	0.81～2.87	0.032～0.113	193	28.0	241	35.0	172	25.0	—	—	2
	2.90～6.32	0.114～0.162	193	28.0	241	35.0	172	25.0	—	—	3

⊖ 原版有误，应改为117。——译者注。

（续）

合金及其状态	规定厚度①		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率③（%）
			最小		最大		最小②		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
3005-H18	0.15~0.79	0.006~0.031	221	32.0	—	—	200	29.0	—	—	1
	0.81~3.25	0.032~0.128	221	32.0	—	—	200	29.0	—	—	2
3005-H19	0.15~0.30	0.006~0.012	234	34.0	—	—	—	—	—	—	—
	0.33~1.60	0.013~0.063	234	34.0	—	—	—	—	—	—	1
3005-H25	0.15~0.48	0.006~0.019	179	26.0	234	34.0	152	22.0	—	—	1
	0.51~0.79	0.020~0.031	179	26.0	234	34.0	152	22.0	—	—	2
	0.81~1.27	0.032~0.050	179	26.0	234	34.0	152	22.0	—	—	3
	1.29~2.03	0.051~0.080	179	26.0	234	34.0	152	22.0	—	—	4
3005-H26	0.15~0.48	0.006~0.019	193	28.0	248	36.0	165	24.0	—	—	1
	0.51~0.79	0.020~0.031	193	28.0	248	36.0	165	24.0	—	—	2
	0.81~1.29	0.032~0.050	193	28.0	248	36.0	165	24.0	—	—	3
	1.29~2.03	0.051~0.080	193	28.0	248	36.0	165	24.0	—	—	4
3005-H27	0.15~0.48	0.006~0.019	203	29.5	259	37.5	179	26.0	—	—	1
	0.51~0.79	0.020~0.031	203	29.5	259	37.5	179	26.0	—	—	2
	0.81~1.27	0.032~0.050	203	29.5	259	37.5	179	26.0	—	—	3
	1.29~2.03	0.051~0.080	203	29.5	259	37.5	179	26.0	—	—	4
3005-H28	0.15~0.48	0.006~0.019	214	31.0	—	—	186	27.0	—	—	1
	0.51~0.79	0.020~0.031	214	31.0	—	—	186	27.0	—	—	2
	0.81~1.27	0.032~0.050	214	31.0	—	—	186	27.0	—	—	3
	1.29~2.03	0.051~0.080	214	31.0	—	—	186	27.0	—	—	4
3105-O	0.33~0.48	0.013~0.019	97	14.0	145	21.0	34	5.0	—	—	16
	0.51~0.79	0.020~0.031	97	14.0	145	21.0	34	5.0	—	—	18
	0.81~2.03	0.032~0.080	97	14.0	145	21.0	34	5.0	—	—	20
3105-H12	0.43~0.48	0.017~0.019	131	19.0	179	26.0	103	15.0	—	—	1
	0.51~0.79	0.020~0.031	131	19.0	179	26.0	103	15.0	—	—	1
	0.81~1.27	0.032~0.050	131	19.0	179	26.0	103	15.0	—	—	2
	1.29~2.03	0.051~0.080	131	19.0	179	26.0	103	15.0	—	—	3
3105-H14	0.33~0.48	0.013~0.019	152	22.0	200	29.0	124	18.0	—	—	1
	0.51~0.79	0.020~0.031	152	22.0	200	29.0	124	18.0	—	—	1
	0.81~1.27	0.032~0.050	152	22.0	200	29.0	124	18.0	—	—	2
	1.29~2.03	0.051~0.080	152	22.0	200	29.0	124	18.0	—	—	2
3105-H16	0.33~0.79	0.013~0.031	172	25.0	221	32.0	145	21.0	—	—	1
	0.81~1.27	0.032~0.050	172	25.0	221	32.0	145	21.0	—	—	2
	1.29~2.03	0.051~0.080	172	25.0	221	32.0	145	21.0	—	—	2
3105-H18	0.33~0.79	0.013~0.031	193	28.0	—	—	165	24.0	—	—	1

（续）

合金及其状态	规定厚度[①]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[③]（%）
			最小		最大		最小[②]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
3105-H18	0.81～1.27	0.032～0.050	193	28.0	—	—	165	24.0	—	—	1
	1.29～2.03	0.051～0.080	193	28.0	—	—	165	24.0	—	—	2
3105-H25	0.33～0.48	0.013～0.019	159	23.0	—	—	131	19.0	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	159	23.0	—	—	131	19.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	159	23.0	—	—	131	19.0	—	—	4
	1.29～2.03	0.051～0.080	159	23.0	—	—	131	19.0	—	—	6
5005-O	0.15～0.18	0.006～0.007	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	12
	0.20～0.30	0.008～0.012	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	14
	0.33～0.48	0.013～0.019	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	16
	0.51～0.79	0.020～0.031	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	18
	0.81～1.27	0.032～0.050	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	20
	1.29～2.87	0.051～0.113	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	21
	2.90～6.32	0.114～0.249	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	22
	6.35～76.2	0.250～3.000	103	15.0	145	21.0	34	5.0	—	—	22
5005-H12	0.43～0.48	0.017～0.019	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	4
	1.29～2.87	0.051～0.113	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	6
	2.89～4.09	0.114～0.161	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	7
	4.11～6.32	0.162～0.249	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	8
	6.35～12.67	0.250～0.499	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	9
	12.70～50.80	0.500～2.000	124	18.0	165	24.0	97	14.0	—	—	10
5005-H14	0.23～0.79	0.009～0.031	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	1
	0.81～1.27	0.032～0.050	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	2
	1.29～2.87	0.051～0.113	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	3
	2.90～4.09	0.114～0.161	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	5
	4.11～6.32	0.162～0.249	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	6
	6.35～12.67	0.250～0.499	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	8
	12.70～25.40	0.500～1.000	145	21.0	186	27.0	117	17.0	—	—	10
5005-H16	0.15～0.79	0.006～0.031	165	24.0	207	30.0	138	20.0	—	—	1
	0.81～1.27	0.032～0.050	165	24.0	207	30.0	138	20.0	—	—	2
	1.29～4.11	0.051～0.162	165	24.0	207	30.0	138	20.0	—	—	3
5005-H18	0.15～0.79	0.006～0.031	186	27.0	—	—	—	—	—	—	1
	0.81～1.27	0.032～0.050	186	27.0	—	—	—	—	—	—	2
	1.29～3.25	0.051～0.128	186	27.0	—	—	—	—	—	—	3

（续）

合金及其状态	规定厚度[1]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[3]（%）
			最小		最大		最小[2]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
5005-H32[4]	0.43～0.48	0.017～0.019	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	3
	0.51～0.79	0.020～0.031	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	4
	0.81～1.27	0.032～0.050	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	5
	1.29～2.87	0.051～0.113	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	7
	2.90～4.09	0.114～0.161	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	8
	4.11～6.32	0.162～0.249	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	9
	6.35～50.80	0.250～2.000	117	17.0	159	23.0	83	12.0	—	—	10
5005-H34[4]	0.23～0.30	0.009～0.012	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	2
	0.33～0.79	0.013～0.031	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	4
	1.29～2.87	0.051～0.113	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	5
	2.90～4.09	0.114～0.161	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	6
	4.11～6.32	0.162～0.249	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	7
	6.35～12.67	0.250～0.499	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	8
	12.70～25.40	0.500～1.00	138	20.0	179	26.0	103	15.0	—	—	10
5005-H36[4]	0.15～0.18	0.006～0.007	159	23.0	200	29.0	124	18.0	—	—	1
	0.20～0.48	0.008～0.019	159	23.0	200	29.0	124	18.0	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	159	23.0	200	29.0	124	18.0	—	—	3
	0.81～4.11	0.032～0.162	159	23.0	200	29.0	124	18.0	—	—	4
5005-H38	0.15～0.30	0.006～0.012	179	26.0	—	—	—	—	—	—	1
	0.33～0.48	0.013～0.019	179	26.0	—	—	—	—	—	—	2
	0.51～0.79	0.020～0.031	179	26.0	—	—	—	—	—	—	3
	0.81～3.25	0.032～0.128	179	26.0	—	—	—	—	—	—	4
5005-H39	0.15～1.60	0.006～0.063	193	28.0	—	—	—	—	—	—	1
5005-H112	6.35～12.67	0.250～0.499	117	17.0	—	—	—	—	—	—	8
	12.70～50.80	0.500～2.000	103	15.0	—	—	—	—	—	—	12
	50.82～76.20	2.001～3.000	100	14.5	—	—	—	—	—	—	18
5050-O	0.15～0.18	0.006～0.007	124	18.0	165	24.0	41	6.0	—	—	—
	0.20～0.48	0.008～0.019	124	18.0	165	24.0	41	6.0	—	—	16
	0.51～0.79	0.020～0.031	124	18.0	165	24.0	41	6.0	—	—	18
	0.81～2.87	0.032～0.113	124	18.0	165	24.0	41	6.0	—	—	20
	2.90～6.32	0.114～0.249	124	18.0	165	24.0	41	6.0	—	—	22
	6.35～76.20	0.250～3.000	124	18.0	165	24.0	41	6.0	—	—	20
5050-H32[4]	0.43～1.27	0.017～0.050	152	22.0	193	28.0	110	16.0	—	—	4
	1.29～6.32	0.051～0.249	152	22.0	193	28.0	110	16.0	—	—	6

（续）

合金及其状态	规定厚度[1]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[3]（%）
			最小		最大		最小[2]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
5050-H34[4]	0.23～0.79	0.009～0.031	172	25.0	214	31.0	138	20.0	—	—	3
	0.81～1.27	0.032～0.050	172	25.0	214	31.0	138	20.0	—	—	4
	1.29～6.32	0.051～0.249	172	25.0	214	31.0	138	20.0	—	—	5
5050-H36[4]	0.15～0.48	0.006～0.019	186	27.0	228	33.0	152	22.0	—	—	2
	0.51～1.27	0.020～0.050	186	27.0	228	33.0	152	22.0	—	—	3
	1.29～4.11	0.051～0.162	186	27.0	228	33.0	152	22.0	—	—	4
5050-H38	0.15～0.18	0.006～0.007	200	29.0	—	—	—	—	—	—	—
	0.20～0.79	0.008～0.031	200	29.0	—	—	—	—	—	—	2
	0.81～1.27	0.032～0.050	200	29.0	—	—	—	—	—	—	3
	1.29～3.25	0.051～0.128	200	29.0	—	—	—	—	—	—	4
5050-H39	0.15～1.60	0.006～0.063	214	31.0	—	—	—	—	—	—	1
5050-H112	6.35～76.20	0.250～3.000	138	20.0	—	—	55	8.0	—	—	12
5052-O	0.15～0.18	0.006～0.007	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	—
	0.20～0.30	0.008～0.012	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	14
	0.33～0.48	0.013～0.019	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	15
	0.51～0.79	0.020～0.031	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	16
	0.81～1.27	0.032～0.050	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	18
	1.30～2.87	0.051～0.113	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	19
	2.90～6.32	0.114～0.249	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	20
	6.35～76.20	0.250～3.000	172	25.0	214	31.0	65	9.5	—	—	18
5052-H32[4]	0.43～0.48	0.017～0.019	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	4
	0.51～1.27	0.020～0.050	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	5
	1.30～2.87	0.051～0.113	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	7
	2.90～6.32	0.114～0.249	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	9
	6.35～12.67	0.250～0.499	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	11
	12.70～50.80	0.500～2.000	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	12
5052-H34[4]	0.23～0.48	0.009～0.019	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	3
	0.51～1.27	0.020～0.050	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	4
	1.30～2.87	0.051～0.113	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	6
	2.90～6.32	0.114～0.249	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	7
	6.35～25.40	0.250～1.000	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	10
5052-H36[4]	0.15～0.18	0.006～0.007	255	37.0	303	44.0	200	29.0	—	—	2
	0.20～0.79	0.008～0.031	255	37.0	303	44.0	200	29.0	—	—	3
	0.81～4.11	0.032～0.162	255	37.0	303	44.0	200	29.0	—	—	4
5052-H38[4]	0.15～0.18	0.006～0.007	269	39.0	—	—	221	32.0	—	—	2

（续）

合金及其状态	规定厚度①		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率③（%）
			最小		最大		最小②		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
5052-H38④	0.20~0.79	0.008~0.031	269	39.0	—	—	221	32.0	—	—	3
	0.81~3.25	0.032~0.128	269	39.0	—	—	221	32.0	—	—	4
5052-H112	6.35~12.67	0.250~0.499	193	28.0	—	—	110	16.0	—	—	7
	12.70~05.80㊀	0.500~2.000	172	25.0	—	—	65	9.5	—	—	12
	50.83~76.20	2.001~3.000	172	25.0	—	—	65	9.5	—	—	16
5083-O	1.30~38.10	0.051~1.500	276	40.0	352	51.0	124	18.0	200	29.0	16
	38.13~76.20	1.501~3.000	269	39.0	345	50.0	117	17.0	200	29.0	16
	76.23~101.60	3.001~4.000	262	38.0	—	—	110	16.0	—	—	16
	101.63~127.00	4.001~5.000	262	38.0	—	—	110	16.0	—	—	14
	127.03~177.80	5.001~7.000	255	37.0	—	—	103	15.0	—	—	14
	177.83~203.20	7.001~8.000	248	36.0	—	—	97	14.0	—	—	12
5083-H112	6.35~38.10	0.250~1.500	276	40.0	—	—	124	18.0	—	—	12
	38.13~76.20	1.501~3.000	269	39.0	—	—	117	17.0	—	—	12
5083-H116⑤⑥	0.10~12.67	0.063~0.499	303	44.0	—	—	214	31.0	—	—	10
	12.70~31.75	0.500~1.250	303	44.0	—	—	214	31.0	—	—	12
	31.78~38.10	1.251~1.500	303	44.0	—	—	214	31.0	—	—	12
	38.13~76.20	1.501~3.000	283	41.0	—	—	200	290㊁	—	—	12
5083-H321	4.78~38.10	0.188~1.500	303	44.0	386	56.0	214	31.0	296	43.0	12
	38.13~76.20	1.501~3.000	283	41.0	386	56.0	200	29.0	296	43.0	12
5086-O	0.51~1.27	0.020~0.50㊂	241	35.0	303	44.0	97	14.0	—	—	15
	1.30~6.32	0.051~0.249	241	35.0	303	44.0	97	14.0	—	—	18
	6.35~50.80	0.250~2.000	241	35.0	303	44.0	97	14.0	—	—	16
5086-H32④	0.51~1.27	0.020~0.050	276	40.0	324	47.0	193	28.0	—	—	6
	1.30~6.32	0.051~0.249	276	40.0	324	47.0	193	28.0	—	—	8
	6.35~50.80	0.250~2.000	276	40.0	324	47.0	193	28.0	—	—	12
5086-H34④	0.23~0.48	0.009~0.019	303	44.0	352	51.0	234	34.0	—	—	4
	0.51~1.27	0.020~0.050	303	44.0	352	51.0	234	34.0	—	—	5
	1.30~6.32	0.051~0.249	303	44.0	352	51.0	234	34.0	—	—	6
	6.35~25.40	0.250~1.000	303	44.0	352	51.0	234	34.0	—	—	10
5086-H36④	0.15~0.48	0.006~0.019	324	47.0	372	54.0	262	38.0	—	—	3
	0.51~1.27	0.020~0.050	324	47.0	372	54.0	262	38.0	—	—	4
	1.30~4.11	0.051~0.162	324	47.0	372	54.0	262	38.0	—	—	6

㊀ 原书有误，应为50.80。——译者注。

㊁ 原书有误，应为29.0。——译者注。

㊂ 原书有误，应为0.050。——译者注。

（续）

合金及其状态	规定厚度[1]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[3] (%)
			最小		最大		最小[2]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
5086-H38[4]	0.15~0.51	0.006~0.020	345	50.0	—	—	283	41.0	—	—	3
5086-H112	4.78~12.67	0.188~0.499	248	36.0	—	—	124	18.0	—	—	8
	12.70~25.40	0.500~1.000	241	35.0	—	—	110	16.0	—	—	10
	25.43~50.80	1.001~2.000	241	35.0	—	—	97	14.0	—	—	14
	50.83~76.20	2.001~3.000	234	34.0	—	—	97	14.0	—	—	14
5086-H116[5][6]	0.10~6.32	0.063~0.249	276	40.0	—	—	193	28.0	—	—	8
	6.35~12.67	0.250~0.499	276	40.0	—	—	193	28.0	—	—	10
	12.70~31.75	0.500~1.250	276	40.0	—	—	193	28.0	—	—	10
	31.78~50.80	1.251~2.000	276	40.0	—	—	193	28.0	—	—	10
5154-O	0.51~0.79	0.020~0.031	207	30.0	283	41.0	76	11.0	—	—	12
	0.81~1.27	0.032~0.050	207	30.0	283	41.0	76	11.0	—	—	14
	1.30~2.87	0.051~0.113	207	30.0	283	41.0	76	11.0	—	—	16
	2.90~76.20	0.114~3.000	207	30.0	283	41.0	76	11.0	—	—	18
5154-H32[4]	0.51~1.27	0.020~0.050	248	36.0	296	43.0	179	26.0	—	—	5
	1.30~6.32	0.051~0.249	248	36.0	296	43.0	179	26.0	—	—	8
	6.35~50.80	0.250~2.000	248	36.0	296	43.0	179	26.0	—	—	12
5154-H34[4]	0.23~1.27	0.009~0.050	269	39.0	317	46.0	200	29.0	—	—	4
	1.30~4.09	0.051~0.161	269	39.0	317	46.0	200	29.0	—	—	6
	4.11~6.32	0.162~0.249	269	39.0	317	46.0	200	29.0	—	—	7
	6.35~25.40	0.250~1.000	269	39.0	317	46.0	200	29.0	—	—	10
5154-H36[4]	0.15~1.27	0.006~0.050	290	42.0	338	49.0	221	32.0	—	—	3
	1.30~2.87	0.051~0.113	290	42.0	338	49.0	221	32.0	—	—	4
	2.90~4.11	0.114~0.162	290	42.0	338	49.0	221	32.0	—	—	5
5154-H38[4]	0.15~1.27	0.006~0.050	310	45.0	—	—	241	35.0	—	—	3
	1.30~2.87	0.051~0.113	310	45.0	—	—	241	35.0	—	—	4
	2.90~3.25	0.114~0.128	310	45.0	—	—	241	35.0	—	—	5
5154-H112	6.35~12.67	0.250~0.499	221	32.0	—	—	124	18.0	—	—	8
	12.70~50.80	0.500~2.000	207	30.0	—	—	76	11.0	—	—	11
	50.83~76.20	2.001~3.000	207	30.0	—	—	76	11.0	—	—	15
5454-O	0.51~0.79	0.020~0.31[⊖]	214	31.0	283	41.0	83	12.0	—	—	12
	0.81~1.27	0.032~0.050	214	31.0	283	41.0	83	12.0	—	—	14
	1.30~2.87	0.051~0.113	214	31.0	283	41.0	83	12.0	—	—	16
	2.90~76.20	0.114~3.000	214	31.0	283	41.0	83	12.0	—	—	18

⊖ 原书有误，应有0.031。——译者注。

（续）

合金及其状态	规定厚度[1]		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[3]（%）
			最小		最大		最小[2]		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
5454-H32[4]	0.51～1.27	0.020～0.050	248	36.0	303	44.0	179	26.0	—	—	5
	1.30～6.32	0.051～0.249	248	36.0	303	44.0	179	26.0	—	—	8
	6.35～50.80	0.250～2.000	248	36.0	303	44.0	179	26.0	—	—	12
5454-H34[4]	0.51～1.27	0.020～0.050	269	39.0	324	47.0	200	29.0	—	—	4
	1.30～4.09	0.051～0.161	269	39.0	324	47.0	200	29.0	—	—	6
	4.11～6.32	0.162～0.249	269	39.0	324	47.0	200	29.0	—	—	7
	6.35～25.40	0.250～1.000	269	39.0	324	47.0	200	29.0	—	—	10
5454-H112	6.35～12.67	0.250～0.499	221	32.0	—	—	124	18.0	—	—	8
	12.70～50.80	0.500～2.000	214	31.0	—	—	83	12.0	—	—	11
	50.83～76.20	2.001～3.000	214	31.0	—	—	83	12.0	—	—	15
5456-O	1.30～38.10	0.051～1.500	290	42.0	365	53.0	131	19.0	207	30.0	16
	38.13～76.20	1.501～3.000	283	41.0	358	52.0	124	18.0	207	30.0	16
	76.23～127.00	3.001～5.000	276	40.0	—	—	117	17.0	—	—	14
	127.03～177.80	5.001～7.000	269	39.0	—	—	110	16.0	—	—	14
	177.83～203.20	7.001～8.000	262	38.0	—	—	103	15.0	—	—	12
5456-H112[5]	6.35～38.10	0.250～1.500	290	42.0	—	—	131	19.0	—	—	12
	38.13～76.20	1.501～3.000	283	41.0	—	—	124	18.0	—	—	12
5456-H116[5][6]	1.60～12.67	0.063～0.499	317	46.0	—	—	228	33.0	—	—	10
	12.70～31.75	0.500～1.250	317	46.0	—	—	228	33.0	—	—	12
	31.78～38.10	1.251～1.500	303	44.0	—	—	214	31.0	—	—	12
	38.13～76.20	1.501～3.000	283	41.0	—	—	200	29.0	—	—	12
	76.23～101.60	3.001～4.000	276	40.0	—	—	172	25.0	—	—	12
5456-H321	4.78～12.67	0.188～0.499	317	46.0	407	59.0	228	33.0	317	46.0	12
	12.70～38.10	0.500～1.500	303	44.0	386	56.0	214	31.0	303	44.0	12
	38.13～76.20	1.501～3.000	283	41.0	372	54.0	200	29.0	296	43.0	12
5652-O	0.15～0.18	0.006～0.007	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	—
	0.20～0.30	0.008～0.012	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	14
	0.33～0.48	0.013～0.019	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	15
	0.51～0.79	0.020～0.031	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	16
	0.81～1.27	0.032～0.050	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	18
	1.29～2.87	0.051～0.113	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	19
	2.90～6.32	0.114～0.249	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	20
	6.35～76.20	0.250～3.00	172	25.0	214	31.0	66	9.5	—	—	18
5652-H32[4]	0.43～0.48	0.017～0.019	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	4
	0.51～1.27	0.020～0.050	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	5

(续)

合金及其状态	规定厚度①		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率③(%)
			最小		最大		最小②		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
5652-H32④	1.29~2.87	0.051~0.113	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	7
	2.90~6.32	0.114~0.249	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	9
	6.35~12.67	0.250~0.499	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	11
	12.70~50.80	0.500~2.000	214	31.0	262	38.0	159	23.0	—	—	12
5652-H34④	0.23~0.48	0.009~0.019	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	3
	0.51~1.27	0.020~0.050	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	4
	1.29~2.87	0.051~0.113	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	6
	2.90~6.32	0.114~0.249	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	7
	6.35~25.4	0.250~1.000	234	34.0	283	41.0	179	26.0	—	—	10
5652-H36④	0.15~0.18	0.006~0.007	255	37.0	303	44.0	200	29.0	—	—	2
	0.20~0.79	0.008~0.031	255	37.0	303	44.0	200	29.0	—	—	3
	0.81~4.1	0.032~0.162	255	37.0	303	44.0	200	29.0	—	—	4
5652-H38④	0.15~0.18	0.006~0.007	269	39.0	—	—	221	32.0	—	—	2
	0.20~0.79	0.008~0.031	269	39.0	—	—	221	32.0	—	—	3
	0.81~3.25	0.032~0.128	269	39.0	—	—	221	32.0	—	—	4
5652-H112	6.35~12.67	0.250~0.499	193	28.0	—	—	110	16.0	—	—	7
	12.70~50.80	0.500~2.000	172	25.0	—	—	66	9.5	—	—	12
	50.83~76.20	2.001~3.000	172	25.0	—	—	66	9.5	—	—	16
5657-H241⑦	0.76~2.29	0.030~0.090	124	18.0	179	26.0	—	—	—	—	13
5657-H25	0.76~2.29	0.030~0.090	138	20.0	193	28.0	—	—	—	—	8
5657-H26	0.76~2.29	0.030~0.090	152	22.0	207	30.0	—	—	—	—	7
5657-H28	0.76~2.29	0.030~0.090	172	25.0	—	—	—	—	—	—	5

注：所换算的国际单位制(SI，米制)仅供参考而不作技术指标或判别合格与否之用。

①所用的试件种类取决于材料的厚度。 ②不测最小屈服强度，除非另有特别规定。 ③按50mm(2in)或4d。 ④对于相应的H2状态，最大抗拉强度和最小屈服强度值不适用。 ⑤当由购方收到立即进行试验时，其状态的材料要求能通过耐剥落腐蚀试验(ASSET方法)。可以用显微镜测定各组经改进后的耐剥落腐蚀能力，以此保证其显微组织没有明显的由铝镁析出物构成的连续晶粒边界网络。将显微组织与事先设定的合格参照显微照片进行比较。 ⑥还适用于过去代号为H117的材料。 ⑦这种材料需经受某种再结晶，并伴随着光泽的消失。

表3.1-29 可热处理铝合金薄板和厚板的力学性能极限值

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率①(%)
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2014-O 薄板和厚板	0.51~12.67	0.020~0.499	—	—	221	32.0	—	—	110	16.0	16
	12.70~25.40	0.500~1.000	—	—	221	32.0	—	—	—	—	10
2014-T3 平薄板	0.51~0.99	0.020~0.039	407	59.0	—	—	241	35.0	—	—	14
	1.02~6.32	0.040~0.249	407	59.0	—	—	248	36.0	—	—	14

（续）

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[①]（%）
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2014-T4 薄板卷材	0.51～6.32	0.020～0.249	407	59.0	—	—	241	35.0	—	—	14
2014-T451[②③]厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	400	58.0	—	—	248	36.0	—	—	14
	12.70～25.40	0.500～1.000	400	58.0	—	—	248	36.0	—	—	14
	25.43～50.80	1.001～2.000	400	58.0	—	—	248	36.0	—	—	12
	50.83～76.20	2.001～3.000	393	57.0	—	—	248	36.0	—	—	8
2014-T42[④⑤]薄板和厚板	0.51～25.40	0.020～1.000	400	58.0	—	—	234	34.0	—	—	14
2014-T6 和 T62[④⑤]薄板	0.51～0.99	0.020～0.039	441	64.0	—	—	393	57.0	—	—	6
	1.02～6.32	0.040～0.249	441	66.0	—	—	400	58.0	—	—	7
2014-T62[④⑤]和 T651[②]厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	462	67.0	—	—	407	59.0	—	—	7
	12.70～25.40	0.500～1.000	462	67.0	—	—	407	59.0	—	—	6
	25.43～50.80	1.001～2.000	462	67.0	—	—	407	59.0	—	—	4
	50.83～63.50	2.001～2.500	448	65.0	—	—	400	58.0	—	—	2
	63.53～76.20	2.501～3.000	434	63.0	—	—	393	57.0	—	—	2
	76.23～101.60	3.001～4.000	407	59.0	—	—	379	55.0	—	—	1
2024-O 薄板和厚板	0.25～12.67	0.010～0.499	—	—	221	32.0	—	—	97	14.0	12
	12.70～44.45	0.500～1.750	—	—	221	32.0	—	—	—	—	12
2024-T3[③]平薄板	0.20～0.23	0.008～0.009	434	63.0	—	—	290	42.0	—	—	10
	0.25～0.51	0.010～0.020	434	63.0	—	—	290	42.0	—	—	12
	0.53～3.25	0.021～0.18[㊀]	434	63.0	—	—	290	42.0	—	—	15
	3.28～6.32	0.129～0.249	441	64.0	—	—	290	42.0	—	—	15
2024-T361[③⑥]平薄板和厚板	0.51～1.57	0.020～0.062	462	67.0	—	—	345	50.0	—	—	8
	1.60～6.32	0.063～0.249	469	68.0	—	—	352	51.0	—	—	9
	6.35～12.67	0.250～0.499	455	66.0	—	—	338	49.0	—	—	9
	12.70	0.500	455	66.0	—	—	338	49.0	—	—	10
2024-T4 薄板卷材	0.25～0.51	0.010～0.020	427	62.0	—	—	276	40.0	—	—	12
	0.53～6.32	0.021～0.249	427	62.0	—	—	276	40.0	—	—	15
2024-T351[②③]厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	441	64.0	—	—	290	42.0	—	—	12
	12.70～25.40	0.500～1.000	434	63.0	—	—	290	42.0	—	—	8
	25.43～38.10	1.001～1.500	427	62.0	—	—	290	42.0	—	—	7
	38.13～50.80	1.501～2.000	427	62.0	—	—	290	42.0	—	—	6
	50.83～76.20	2.001～3.000	414	60.0	—	—	290	42.0	—	—	4
	76.23～101.60	3.001～4.000	393	57.0	—	—	283	41.0	—	—	4

㊀ 原书有误，疑应为0.128。——译者注。

（续）

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[①]（%）
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2024-T42[④⑤] 薄板和厚板	0.25~0.51	0.010~0.020	427	62.0	—	—	262	38.0	—	—	12
	0.53~6.32	0.021~0.249	427	62.0	—	—	262	38.0	—	—	15
	6.35~12.67	0.250~0.499	427	62.0	—	—	262	38.0	—	—	12
	12.70~25.40	0.500~1.000	421	61.0	—		262	38.0	—	—	8
	25.43~38.10	1.001~1.500	414	60.0	—	—	262	38.0	—	—	7
	38.13~50.80	1.501~2.000	414	60.0	—	—	262	38.0	—	—	6
	50.83~76.20	2.001~3.000	400	58.0	—	—	262	38.0	—	—	4
2219-T62[④⑤] 薄板和厚板	0.51~0.99	0.020~0.039	372	54.0	—	—	248	36.0	—	—	6
	1.02~6.32	0.040~0.249	372	54.0	—	—	248	36.0	—	—	7
	6.35~25.40	0.250~1.000	372	54.0	—	—	248	36.0	—	—	8
	25.43~50.80	1.001~2.000	372	54.0	—	—	248	36.0	—	—	7
2219-T81 平薄板	0.51~0.99	0.020~0.039	427	62.0	—	—	317	46.0	—	—	6
	1.02~6.32	0.040~0.249	427	62.0	—	—	317	46.0	—	—	7
2219-T851[②]厚板	6.35~25.40	0.250~1.000	427	62.0	—	—	317	46.0	—	—	8
	25.43~50.80	1.001~2.000	427	62.0	—	—	317	46.0	—	—	7
	50.83~76.20	2.001~3.000	427	62.0	—	—	310	45.0	—	—	6
	76.23~101.60	3.001~4.000	414	60.0	—	—	303	44.0	—	—	5
	101.63~127.00	4.001~5.000	407	59.0	—	—	296	43.0	—	—	5
	127.03~152.40	5.001~6.000	393	57.0	—	—	290	42.0	—	—	4
2219-T87 平薄板和厚板	0.51~0.99	0.020~0.039	441	64.0	—	—	358	52.0	—	—	5
	1.02~6.32	0.040~0.249	441	64.0	—	—	358	52.0	—	—	6
	6.35~25.40	0.250~1.000	441	64.0	—	—	352	51.0	—	—	7
	25.43~50.80	1.001~2.000	441	64.0	—	—	352	51.0	—	—	6
	50.83~76.20	2.001~3.000	441	64.0	—	—	352	51.0	—	—	6
	76.23~101.60	3.001~4.000	427	62.0	—	—	345	50.0	—	—	4
	101.63~127.00	4.001~5.000	421	61.0	—	—	338	49.0	—	—	3
6061-O 薄板和厚板	0.15~0.18	0.006~0.007	—	—	152	22.0	—	—	83	12.0	10
	0.20~0.23	0.008~0.009	—	—	152	22.0	—	—	83	12.0	12
	0.25~0.51	0.010~0.020	—	—	152	22.0	—	—	83	12.0	14
	0.53~3.25	0.021~0.128	—	—	152	22.0	—	—	83	12.0	16
	3.28~12.67	0.129~0.499	—	—	152	22.0	—	—	83	12.0	18
	12.70~25.40	0.500~1.000	—	—	152	22.0	—	—	—	—	18
	25.43~76.20	1.001~3.000	—	—	152	22.0	—	—	—	—	16
6061-T4 薄板	0.15~0.18	0.006~0.007	207	30.0	—	—	110	16.0	—	—	10
	0.20~0.23	0.008~0.009	207	30.0	—	—	110	16.0	—	—	12

（续）

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[①]（%）
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
6061-T4 薄板	0.25～0.51	0.010～0.020	207	30.0	—	—	110	16.0	—	—	14
	0.53～6.32	0.021～0.249	207	30.0	—	—	110	16.0	—	—	16
6061-T451[②③]厚板	6.35～25.40	0.250～1.000	207	30.0	—	—	110	16.0	—	—	18
	25.43～76.20	1.001～3.000	207	30.0	—	—	110	16.0	—	—	16
6061-T42[④⑤] 薄板和厚板	0.15～0.18	0.006～0.007	207	30.0	—	—	97	14.0	—	—	10
	0.20～0.23	0.008～0.009	207	30.0	—	—	97	14.0	—	—	12
	0.25～0.51	0.010～0.020	207	30.0	—	—	97	14.0	—	—	14
	0.53～6.32	0.021～0.249	207	30.0	—	—	97	14.0	—	—	16
	6.35～25.40	0.250～1.000	207	30.0	—	—	97	14.0	—	—	18
	25.43～76.20	1.001～3.000	207	30.0	—	—	97	14.0	—	—	16
6061-T6 和 T62[④⑤]薄板	0.15～0.18	0.006～0.007	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	4
	0.20～0.23	0.008～0.009	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	6
	0.25～0.51	0.010～0.020	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	8
	0.53～6.32	0.021～0.249	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	10
6061-T62[④⑤] 和 T651[②] 厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	10
	12.70～25.40	0.500～1.000	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	9
	25.43～50.80	1.001～2.000	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	8
	50.83～101.60	2.001～4.000	290	42.0	—	—	241	35.0	—	—	6
	101.63～152.40	4.001～6.00[⑧]	276	40.0	—	—	241	35.0	—	—	6
7075-O 薄板和厚板	0.38～12.67	0.015～0.499	—	—	276	40.0	—	—	145	21.0	10
	12.70～50.80	0.500～2.000	—	—	276	40.0	—	—	—	—	10
7075-T6 和 T62[④⑤]薄板	0.20～0.28	0.008～0.011	510	74.0	—	—	434	63.0	—	—	5
	0.30～0.99	0.012～0.039	524	76.0	—	—	462	67.0	—	—	7
	1.02～3.18	0.040～0.125	538	78.0	—	—	469	68.0	—	—	8
	3.21～6.32	0.126～0.249	538	78.0	—	—	476	69.0	—	—	8
7075-T62[④⑤] 和 T651[②] 厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	538	78.0	—	—	462	67.0	—	—	9
	12.70～25.40	0.500～1.000	538	78.0	—	—	469	68.0	—	—	7
	25.43～50.80	1.001～2.000	531	77.0		—	462	67.0	—	—	6
	50.83～63.50	2.001～2.500	524	76.0	—	—	441	64.0	—	—	5
	63.53～76.20	2.501～3.000	496	72.0	—	—	421	61.0	—	—	5
	76.23～88.90	3.001～3.500	489	71.0	—	—	400	58.0	—	—	5
	88.93～101.60	3.501～4.000	462	67.0	—	—	372	54.0	—	—	3
7075-T73[⑨]薄板	1.02～6.32	0.040～0.249	462	67.0	—	—	386	56.0	—	—	8
7075-T7351[②⑨]厚板	6.35～25.40	0.250～1.000	476	69.0	—	—	393	57.0	—	—	7
	25.43～50.80	1.001～2.000	476	69.0	—	—	393	57.0	—	—	6

（续）

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率①（%）
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
7075-T7351②⑨厚板	50.83~63.50	2.001~2.500	455	66.0	—	—	358	52.0	—	—	6
	63.53~76.20	2.501~3.000	441	64.0	—	—	338	49.0	—	—	6
7075-T76⑩薄板	3.18~6.32	0.125~0.249	503	73.0	—	—	427	62.0	—	—	8
7075-T7351②⑨厚板	6.35~25.40	0.250~1.000	476	69.0	—	—	393	57.0	—	—	7
	25.43~50.80	1.001~2.000	476	69.0	—	—	393	57.0	—	—	6
	50.83~63.50	2.001~2.500	455	66.0	—	—	358	52.0	—	—	6
	63.53~76.20	2.501~3.000	441	64.0	—	—	338	49.0	—	—	6
7075-T76⑩薄板	3.18~6.32	0.125~0.249	503	73.0	—	—	427	62.0	—	—	8
7075-T7651④⑩厚板	6.35~12.67	0.250~0.499	496	72.0	—	—	421	61.0	—	—	8
	12.70~25.40	0.500~1.000	489	71.0	—	—	414	60.0	—	—	6
7178-O 薄板和厚板	0.38~12.67	0.015~0.499	—	—	276	40.0	—	—	145	21.0	10
	12.70	0.500	—	—	276	40.0	—	—	—	—	10
7178-T6 和 T62④⑤薄板	0.38~1.12	0.015~0.044	572	83.0	—	—	496	72.0	—	—	7
	1.14~6.32	0.045~0.249	579	84.0	—	—	503	73.0	—	—	8
7178-T62④⑤和 T651②厚板	6.35~12.67	0.250~0.499	579	84.0	—	—	503	73.0	—	—	8
	12.70~25.40	0.500~1.000	579	84.0	—	—	503	73.0	—	—	6
	25.43~38.10	1.001~1.500	579	84.0	—	—	503	73.0	—	—	4
	38.13~50.80	1.501~2.000	552	80.0	—	—	483	70.0	—	—	3
2024-T62④⑤薄板和厚板	0.25~12.67	0.010~0.499	441	64.0	—	—	345	50.0	—	—	5
	12.70~76.20	0.500~3.000	434	63.0	—	—	345	50.0	—	—	5
2024-T72④⑤薄板	0.25~6.32	0.010~0.249	414	60.0	—	—	317	46.0	—	—	5
2024-T81 平薄板	0.25~6.32	0.010~0.249	462	67.0	—	—	400	58.0	—	—	5
2024-T851②厚板	6.35~12.67	0.250~0.499	462	67.0	—	—	400	58.0	—	—	5
	12.70~25.40	0.500~1.000	455	66.0	—	—	400	58.0	—	—	5
	25.43~38.07	1.001~1.499	455	66.0	—	—	393	57.0	—	—	5
2024-T861⑥平薄板和厚板	0.51~1.57	0.020~0.062	483	70.0	—	—	427	62.0	—	—	3
	1.60~6.32	0.063~0.249	489	71.0	—	—	455	66.0	—	—	4
	6.35~12.67	0.250~0.499	483	70.0	—	—	441	64.0	—	—	4
	12.70	0.500	483	70.0	—	—	441	64.0	—	—	4
包铝(Alclad)2024-O 薄板和厚板	0.20~0.23	0.008~0.009	—	—	207	30.0	—	—	97	14.0	10
	0.25~0.81	0.010~0.032	—	—	207	30.0	—	—	97	14.0	12
	0.84~1.57	0.033~0062	—	—	207	30.0	—	—	97	14.0	12
	1.60~4.75	0.063~0.187	—	—	221	32.0	—	—	97	14.0	12
	4.78~12.67	0.188~0.499	—	—	221	32.0	—	—	97	14.0	12
	12.70~44.45	0.500~1.750	—	—	221	32.0⑧	—	—	—	—	12

（续）

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[①]
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	（%）
包铝（Alclad）2024-T3[③]平薄板	0.20～0.23	0.008～0.009	400	58.0	—	—	269	39.0	—	—	10
	0.25～0.51	0.010～0.020	407	59.0	—	—	269	39.0	—	—	12
	0.53～1.57	0.021～0.062	407	59.0	—	—	269	39.0	—	—	15
	1.60～3.25	0.063～0.128	421	61.0	—	—	276	40.0	—	—	15
	3.28～6.32	0.129～0.249	427	62.0	—	—	276	40.0	—	—	15
包铝（Alclad）2024-T361[③⑥]平薄板和厚板	0.51～1.57	0.020～0.062	421	61.0	—	—	324	47.0	—	—	8
	1.60～4.75	0.063～0.187	441	64.0	—	—	331	48.0	—	—	9
	4.78～6.32	0.188～0.249	441	64.0	—	—	331	48.0	—	—	9
	6.35～12.67	0.25～0.499	441	64.0	—	—	331	48.0	—	—	9
	12.70	0.500	455	66.0[⑦]	—	—	338	49.0[⑦]	—	—	10
包铝（Alclad）2024-T4薄板卷材	0.25～0.51	0.01～0.020	400	58.0	—	—	248	36.0	—	—	12
	0.53～1.57	0.021～0.062	400	58.0	—	—	248	36.0	—	—	15
	1.60～3.25	0.063～0.128	421	61.0	—	—	262	38.0	—	—	15
包铝（Alclad）2024-T351[②③]厚板	6.35～12.67	0.25～0.499	427	62.0	—	—	276	40.0	—	—	12
	12.70～25.40	0.500～1.000	434	63.0[⑦]	—	—	290	42.0[⑦]	—	—	8
	25.43～38.10	1.001～1.500	427	62.0[⑦]	—	—	290	42.0[⑦]	—	—	7
	38.13～50.80	1.501～2.000	427	62.0[⑦]	—	—	290	42.0[⑦]	—	—	6
	50.83～76.20	2.001～3.000	414	60.0[⑦]	—	—	290	42.0[⑦]	—	—	4
	76.23～101.60	3.001～4.000	393	57.0[⑦]	—	—	283	41.0[⑦]	—	—	4
包铝（Alclad）2024-T42[④⑤]薄板和厚板	0.20～0.23	0.008～0.009	379	55.0	—	—	234	34.0	—	—	10
	0.25～0.51	0.01～0.020	393	57.0	—	—	234	34.0	—	—	12
	0.53～1.57	0.021～0.062	393	57.0	—	—	234	34.0	—	—	15
	1.60～4.75	0.063～0.187	414	60.0	—	—	248	36.0	—	—	15
	4.78～6.32	0.188～0.249	414	60.0	—	—	248	36.0	—	—	15
	6.35～12.67	0.25～0.499	414	60.0	—	—	248	36.0	—	—	12
	12.70～25.40	0.500～1.000	421	61.0[⑦]	—	—	262	38.0[⑦]	—	—	8
	25.43～38.10	1.001～1.500	414	60.0[⑦]	—	—	262	38.0[⑦]	—	—	7
	38.13～50.80	1.501～2.000	414	60.0[⑦]	—	—	262	38.0[⑦]	—	—	6
	50.83～76.20	2.001～3.000	400	58.0[⑦]	—	—	262	38.0[⑦]	—	—	4
包铝（Alclad）2024-T62[④⑤]薄板和厚板	0.25～1.57	0.010～0.062	414	60.0	—	—	324	47.0	—	—	5
	1.60～4.75	0.063～0.187	427	62.0	—	—	338	49.0	—	—	5
	4.78～12.67	0.188～0.499	427	62.0	—	—	338	49.0	—	—	5
包铝（Alclad）2024～T72[④⑤]薄板	0.25～1.57	0.010～0.062	386	56.0	—	—	296	43.0	—	—	5
	1.60～4.75	0.063～0.187	400	58.0	—	—	310	45.0	—	—	5
	4.78～6.32	0.188～0.249	400	58.0	—	—	310	45.0	—	—	5

（续）

合金及其状态	规定厚度		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[1]（%）
			最小		最大		最小		最大		
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
包铝（Alclad）2024-T81平薄板	0.25～1.57	0.01～0.062	427	62.0	—	—	372	54.0	—	—	5
	1.60～4.75	0.063～0.187	448	65.0	—	—	386	56.0	—	—	5
	4.78～6.32	0.188～0.249	448	65.0	—	—	386	56.0	—	—	5
包铝（Alclad）2024-T851[2]厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	488	65.0	—	—	386	56.0	—	—	5
	12.70～25.40	0.500～1.000	455	66.0[7]	—	—	400	58.0[7]	—	—	5
包铝（Alclad）2024-T861[6]平薄板和厚板	0.51～1.57	0.020～0.062	441	64.0	—	—	400	58.0	—	—	3
	1.60～4.75	0.063～0.187	476	69.0	—	—	441	64.0	—	—	4
	4.78～6.32	0.188～0.249	476	69.0	—	—	441	64.0	—	—	4
	6.35～12.67	0.250～0.499	469	68.0	—	—	427	62.0	—	—	4
	12.70	0.500	483	70.0[7]	—	—	441	64.0	—	—	4
2036-T4 平薄板	0.64～3.18	0.025～0.125	290	42.0	—	—	159	23.0	—	—	20
2219-O 薄板和厚板	0.51～50.83	0.020～2.000	—	—	221	32.0	—	—	110	16.0	12
2219-T31[3]平薄板	0.51～0.99	0.020～0.039	317	46.0	—	—	200	29.0	—	—	8
	1.02～6.32	0.040～0.249	317	46.0	—	—	193	28.0	—	—	10
2219-T351[2][3]厚板	6.35～50.80	0.250～2.000	317	46.0	—	—	193	28.0	—	—	10
	50.83～76.20	2.001～3.000	303	44.0	—	—	193	28.0	—	—	10
	76.23～101.60	3.001～4.000	290	42.0	—	—	186	27.0	—	—	9
	101.63～127.00	4.001～5.000	276	40.0	—	—	179	26.0	—	—	9
	127.03～152.40	5.001～6.000	269	39.0	—	—	172	25.0	—	—	8
2219-T37[3] 平薄板和厚板	0.51～0.99	0.020～0.039	338	49.0	—	—	262	38.0	—	—	6
	1.02～50.80	0.040～2.000	338	49.0	—	—	255	37.0	—	—	6
	50.83～63.50	2.010～2.500	338	49.0	—	—	255	37.0	—	—	6
	63.53～76.20	2.501～3.000	324	47.0	—	—	248	36.0	—	—	6
	76.23～101.60	3.001～4.000	310	45.0	—	—	241	35.0	—	—	5
	101.63～127.00	4.001～5.000	296	43.0	—	—	234	34.0	—	—	4
7178-T76[10]薄板	1.14～6.32	0.045～0.249	517	75.0	—	—	441	64.0	—	—	8
7178-T7651[2][10]厚板	6.35～12.67	0.250～0.499	510	74.0	—	—	434	63.0	—	—	8
	12.70～25.40	0.500～1.000	503	73.0	—	—	427	62.0	—	—	6
7475-T61 薄板	1.02～6.32	0.040～0.249	490	71.0	—	—	414	60.0	—	—	9

合金及其状态	规定厚度		试件轴线方向[1]	抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[1]（%）
				最小		最大		最小		最大		
	mm	in		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2124-T851[2]厚板	38.10～50.80	1.500～2.000	L	455	66.0	—	—	393	57.0	—	—	6
			LT	455	66.0	—	—	393	57.0	—	—	5
			ST	441	64.0	—	—	379	55.0	—	—	1.5

（续）

合金及其状态	规定厚度		试件轴线方向[11]	抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[1]（%）
				最小		最大		最小		最大		
	mm	in		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2124-T851[2]厚板	50.83～76.20	2.001～3.000	L	448	65.0	—	—	393	57.0	—	—	6
			LT	448	65.0	—	—	393	57.0	—	—	4
			ST	434	63.0	—	—	379	55.0	—	—	1.5
	76.23～101.60	3.001～4.000	L	448	65.0	—	—	386	56.0	—	—	5
			LT	448	65.0	—	—	386	56.0	—	—	4
			ST	427	62.0	—	—	372	54.0	—	—	1.5
	101.63～127.00	4.001～5.000	L	441	64.0	—	—	379	55.0	—	—	5
			LT	441	64.0	—	—	379	55.0	—	—	4
			ST	421	61.0	—	—	365	53.0	—	—	1.5
	127.03～152.40	5.001～6.000	L	434	63.0	—	—	372	54.0	—	—	5
			LT	434	63.0	—	—	372	54.0	—	—	4
			ST	400	58.0	—	—	352	51.0	—	—	1.5
7050-T7451[2][9]（原7050-T73651）厚板	6.35～50.80	0.250～2.000	L	510	74.0	—	—	441	64.0	—	—	10
			LT	510	74.0	—	—	441	64.0	—	—	9
			ST	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	50.83～76.20	2.001～3.000	L	503	73.0	—	—	434	63.0	—	—	9
			LT	503	73.0	—	—	434	63.0	—	—	8
			ST	469	68.0	—	—	407	59.0	—	—	2
	76.23～101.60	3.001～4.000	L	496	72.0	—	—	427	62.0	—	—	9
			LT	496	72.0	—	—	427	62.0	—	—	6
			ST	469	68.0	—	—	400	58.0	—	—	2
	101.63～127.00	4.001～5.000	L	489	71.0	—	—	421	61.0	—	—	9
			LT	489	71.0	—	—	421	61.0	—	—	5
			ST	462	67.0	—	—	393	57.0	—	—	2
	127.03～152.40	5.001～6.000	L	483	70.0	—	—	414	60.0	—	—	8
			LT	483	70.0	—	—	414	60.0	—	—	4
			ST	462	67.0	—	—	393	57.0	—	—	2
7050-T7651[2][10]厚板	6.35～25.40	0.250～1.000	L	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	9
			LT	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	8
			ST	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	25.43～38.10	1.001～1.500	L	531	77.0	—	—	462	67.0	—	—	9
			LT	531	77.0	—	—	462	67.0	—	—	8
			ST	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	38.13～50.80	1.501～2.000	L	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	9
			LT	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	8

（续）

合金及其状态	规定厚度		试件轴线方向⑪	抗拉强度				屈服强度				最小伸长率①（%）
				最小		最大		最小		最大		
	mm	in		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
7050-T7651②⑩厚板	38.13～50.80	1.501～2.000	ST	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	50.83～76.20	2.001～3.000	L	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	8
			LT	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	7
			ST	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5
7475-T7351厚板	6.35～38.10	0.250～1.500	L	490	71.0	—	—	414	60.0	—	—	10
			LT	490	71.0	—	—	414	60.0	—	—	9
	25.43～38.10	1.001～1.500	ST	462⑫	67.0⑫	—	—	386⑫	56.0⑫	—	—	4⑫
	38.12～50.80	1.501～2.000	L	483	70.0	—	—	400	58.0	—	—	10
			LT	483	70.0	—	—	400	58.0	—	—	8
			ST	455	66.0	—	—	372	54.0	—	—	4
	50.83～63.50	2.001～2.500	L	476	69.0	—	—	393	57.0	—	—	10
			LT	476	69.0	—	—	393	57.0	—	—	8
			ST	448	65.0	—	—	365	53.0	—	—	4
	63.53～76.20	2.501～3.000	L	469	68.0	—	—	386	56.0	—	—	10
			LT	469	68.0	—	—	386	56.0	—	—	8
			ST	448	65.0	—	—	365	53.0	—	—	3
	76.23～88.90	3.001～3.500	L	448	65.0	—	—	365	53.0	—	—	10
			LT	448	65.0	—	—	365	53.0	—	—	8
			ST	448	65.0	—	—	352	51.0	—	—	3
	88.93～101.60	3.501～4.000	L	441	64.0	—	—	359	52.0	—	—	9
			LT	441	64.0	—	—	359	52.0	—	—	7
			ST	434	63.0	—	—	345	50.0	—	—	3

注：所换算的国际单位制SI（米制）仅供参考而不作技术指标或判别合格与否之用。

①按照50mm（2in）或4d。 ②对于应力消除状态的材料，除另有规定的以外，其特征和性能都跟以基本状态的相同材料的相应特征和性能会有所不同。 ③状态为T3/T31、T37、T351、T36和T451的材料，经人工时效能分别开发出相应材料状态为T81、T87、T851、T861和T651的力学性能。 ④通常用户可以自行通过对这些以O（退火）或F（加工后）状态的材料，进行适当的固溶热处理或固溶并析出热处理获得所列的性能。这些性能还适用于O和F状态的材料样品，由生产厂家对其进行固溶热处理或固溶并析出热处理，以此确定材料经这些适当热处理后的效果。然而如果这些材料在固溶热处理以前曾经过成形或经过冷或热加工，特别是处于退火状态的，则由用户自行得到的性能可能低于表中所列的数值。 ⑤这种状态无法由生产厂家提供。 ⑥状态T361和T861的原代号分别为T36和T86。 ⑦本表规定了适用于试验用试件的性能，并且由于厚度为0.500in或以上的厚板，其包覆材料在试件制备的过程中被去除，故表中所列的性能只能适用于心部的材料。依据包覆层的厚度，复合厚板的抗拉强度和屈服强度要略低一些。 ⑧按此厚度给出的性能，仅适用于T651的状态。 ⑨在应力腐蚀试验中，这种状态的材料能够在高度方向承受75%的屈服强度应力达30天之久，而没有任何应力腐蚀开裂的迹象产生。事先按适用的电导率许用指标选用拉伸试件进行试验，用于确定各批次的耐应力腐蚀的能力。 ⑩除非其应力能达到25.0ksi，否则这种状态的材料应按照购方同意的验收方法通过耐剥离腐蚀试验并达到某些试验的应力腐蚀指标。事先按适用的电导率许用指标选用拉伸试件进行试验，用于确定各批次经过改善的耐剥离腐蚀和应力腐蚀开裂的能力。 ⑪L，纵向方向；LT，宽度方向；ST，高度方向。 ⑫仅适用于38.10mm（1.500in）的厚度。

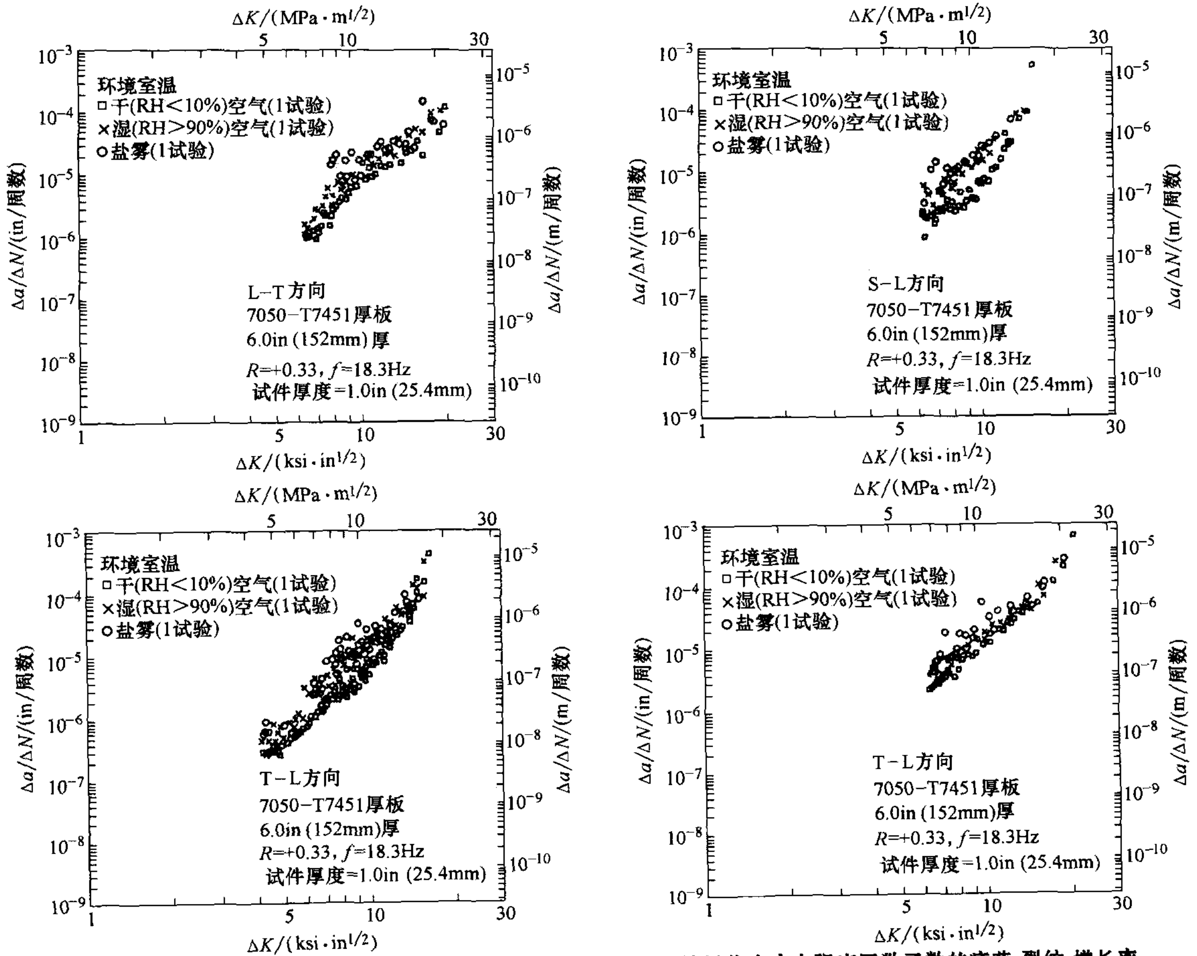


图3.1-28 7045-T7451厚板的两种厚度以三种方向和在三种环境里作为应力强度因数函数的疲劳-裂纹-增长率

表3.1-30 非热处理铝合金挤制线材、圆棒、棒料和型材的力学性能极限值

合金及其状态	规定直径或厚度①		面积		抗拉强度				最小屈服强度		最小伸长率②(%)
					最小		最大				
	mm	in	cm²	in²	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
1100-O	全部	全部	全部	全部	76	11.0	107	15.5	21	3.0	25
1100-H112	全部	全部	全部	全部	76	11.0	—	—	21	3.0	—
3003-O	全部	全部	全部	全部	97	14.0	131	19.0	34	5.0	25
3003-H112	全部	全部	全部	全部	97	14.0	—	—	34	5.0	—
5083-O	≤127	≤5.000	≤206	≤32	269	39.0	352	51.0	110	16.0	14
5083-H111	≤127	≤5.000	≤206	≤32	276	40.0	—	—	165	24.0	12
5083-H112	≤127	≤5.000	≤206	≤32	269	39.0	—	—	110	16.0	12
5086-O	≤127	≤5.000	≤206	≤32	241	35.0	317	46.0	97	14.0	14
5086-H111	≤127	≤5.000	≤206	≤32	248	36.0	—	—	145	21.0	12
5086-H112	≤127	≤5.000	≤206	≤32	241	35.0	—	—	97	14.0	12
5154-O	全部	全部	全部	全部	207	30.0	283	41.0	76	11.0	—
5154-H112	全部	全部	全部	全部	207	30.0	—	—	76	11.0	—
5454-O	≤127	≤5.000	≤206	≤32	214	31.0	283	41.0	83	12.0	14
5454-H111	≤127	≤5.000	≤206	≤32	228	33.0	—	—	131	19.0	12
5454-H112	≤127	≤5.000	≤206	≤32	214	31.0	—	—	83	12.0	12

注：所换算的国际单位制SI(米制)仅供参考，不作技术指标或判别合格与否之使用。

①以拉伸试验试件所用的横截面厚度决定所适用的力学性能。 ②按照50mm(2in)或4d。

表 3.1-31　可热处理铝合金挤制线材、圆棒、棒料和型材的力学性能极限值

合金及其状态	规定直径或厚度[1]		面　积		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[2] (%)
					最小		最大		最小		最大		
	mm	in	cm^2	in^2	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2014-O	全部	全部	全部	全部	—	—	207	30.0	—	—	124	18.0	12
2014-T4，T4510[3,4]和T4511[3,4]	全部	全部	全部	全部	345	50.0	—	—	241	35.0	—	—	12
2014-T42[5,6]	全部	全部	全部	全部	345	50.0	—	—	200	29.0	—	—	12
2014-T6，T6510[3]和T6511[3]	≤12.67	≤0.499	全部	全部	414	60.0	—	—	365	53.0	—	—	7
	12.70～19.02	0.500～0.749	全部	全部	441	64.0	—	—	400	58.0	—	—	7
	≥19.05	≥0.750	≤161	≤25	469	68.0	—	—	414	60.0	—	—	7
	≥19.05	≥0.750	>161～206	>25～32	469	68.0	—	—	400	58.0	—	—	6
2014-T62[5,6]	≤19.02	≤0.749	全部	全部	414	60.0	—	—	365	53.0	—	—	7
	≥19.05	≥0.750	≤161	≤25	414	60.0	—	—	365	53.0	—	—	7
	≥19.05	≥0.750	>161～206	>25～32	414	60.0	—	—	365	53.0	—	—	6
2024-O	全部	全部	全部	全部	—	—	241	35.0	—	—	131	19.0	12
2024-T3，T3510[3,4]和T3511[3,4]	≤6.32	≤0.249	全部	全部	393	57.0	—	—	290	42.0	—	—	12
	6.35～19.02	0.250～0.749	全部	全部	414	60.0	—	—	303	44.0	—	—	12
	19.05～38.07	0.750～1.499	全部	全部	448	65.0	—	—	317	46.0	—	—	10
	≥38.10	≥1.500	≤161	≤25	483	70.0	—	—	358	52.0	—	—	10
	≥38.10	≥1.500	>161～206	>25～32	469	68.0	—	—	331	48.0	—	—	8
2024-T42[5,6]	≤19.02	≤0.749	全部	全部	393	57.0	—		262	38.0	—	—	12
	19.05～38.07	0.750～1.499	全部	全部	393	57.0	—	—	262	38.0	—	—	10
	≥38.10	≥1.500	≤161	≤25	393	57.0	—	—	262	38.0	—	—	10
	≥38.10	≥1.500	>161～206	>25～32	393	57.0	—	—	262	38.0	—	—	8
2024-T81，T8510[3]和T8511[3]	1.27～6.32	0.050～0.249	全部	全部	441	64.0	—	—	386	56.0	—	—	4
	6.35～38.07	0.250～1.499	全部	全部	455	66.0	—	—	400	58.0	—	—	5
	≥38.10	≥1.500	≤206	≤32	455	66.0	—	—	400	58.0	—	—	5

（续）

合金及其状态	规定直径或厚度①		面积		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率②（%）
					最小		最大		最小		最大		
	mm	in	cm²	in²	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
2219-O	全部	全部	全部	全部	—	—	221	32.0	—	—	124	18.0	12
2219-T31，T3510③④和T3511③④	≤12.67	≤0.499	≤161	≤25	290	42.0	—	—	179	26.0	—	—	14
	12.70～76.17	0.500～2.999	≤161	≤25	310	45.0	—	—	186	27.0	—	—	14
2219-T62⑤⑥	≤25.37	≤0.999	≤161	≤25	372	54.0	—	—	248	36.0	—	—	6
	≥25.40	≥1.000	≤206	≤32	372	54.0	—	—	248	36.0	—	—	6
2219-T81，T8510③和T8511③	≤76.17	≤2.999	≤161	≤25	400	58.0	—	—	290	42.0	—	—	6
6005-T1	≤12.70	≤0.500	全部	全部	172	25.0	—	—	103	15.0	—	—	16
6005-T5	≤3.15	≤0.124	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	8
	3.18～25.40	0.125～1.000	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	10
6061-O	全部	全部	全部	全部	—	—	152	22.0	—	—	110	16.0	16
6061-T1	≤15.88	≤0.625	全部	全部	179	26.0	—	—	97	14.0	—	—	16
6061-T4，T4510③④和T4511③④	全部	全部	全部	全部	179	26.0	—	—	110	16.0	—	—	16
6061-T42⑤⑥	全部	全部	全部	全部	179	26.0	—	—	83	12.0	—	—	16
6061-T51	≤15.88	≤0.625	全部	全部	241	35.0	—	—	207	30.0	—	—	8
6061-T6，T62⑤⑥，T6510③和T6511③	≤6.32	≤0.249	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	8
	≥6.35	≥0.250	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	10
6063-O	全部	全部	全部	全部	—	—	131	19.0	—	—	—	—	18
6063-T1	≤12.70	≤0.500	全部	全部	117	17.0	—	—	62	9.0	—	—	12
	12.73～25.40	0.501～1.000	全部	全部	110	16.0	—	—	55	8.0	—	—	12
6063-T4和T42⑤⑥	≤12.70	≤0.500	全部	全部	131	19.0	—	—	69	10.0	—	—	14
	12.73～25.40	0.501～1.000	全部	全部	124	18.0	—	—	62	9.0	—	—	14
6063-T5	≤12.70	≤0.500	全部	全部	152	22.0	—	—	110	16.0	—	—	8
	12.73～25.40	0.501～1.000	全部	全部	145	21.0	—	—	103	15.0	—	—	8

（续）

合金及其状态	规定直径或厚度①		面积		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率②（%）
					最小		最大		最小		最大		
	mm	in	cm²	in²	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
6063-T52	≤25.40	≤1.000	全部	全部	152	22.0	207	30.0	110	16.0	172	25.0	8
6063-T6 和 T62⑤⑥	≤3.15	≤0.124	全部	全部	207	30.0	—	—	172	25.0	—	—	8
	3.18 ~ 25.40	0.125 ~ 1.000	全部	全部	207	30.0	—	—	172	25.0	—	—	10
6066-O	全部	全部	全部	全部	—	—	200	29.0	—	—	124	18.0	16
6066-T4，T4510③④和 T4511③④	全部	全部	全部	全部	276	40.0	—	—	172	25.0	—	—	14
6066-T42⑤⑥	全部	全部	全部	全部	276	40.0	—	—	165	24.0	—	—	14
6066-T6，T6510③和 T6511③	全部	全部	全部	全部	345	50.0	—	—	310	45.0	—	—	8
6066-T62⑤⑥	全部	全部	全部	全部	345	50.0	—	—	290	42.0	—	—	8
6070-T6 和 T62⑤⑥	≤76.17	≤2.999	≤206	≤32	331	48.0	—	—	310	45.0	—	—	6
6105-T1	≤12.70	≤0.500	全部	全部	172	25.0	—	—	103	15.0	—	—	16
6105-T5	≤12.70	≤0.500	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	8
6162-T5，T5510③和 T5511③	≤25.40	≤1.000	全部	全部	255	37.0	—	—	234	34.0	—	—	7
6162-T6，T6510③和 T6511③	≤6.32	≤0.249	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	8
	6.35 ~ 12.67	0.250 ~ 0.499	全部	全部	262	38.0	—	—	241	35.0	—	—	10
6262-T6，T62⑤⑥，T6510③和 T6511③	全部	全部	全部	全部	262	38.0		—	241	35.0	—	—	10
6351-T54	≤12.70	≤0.500	≤129	≤20	207	30.0	—	—	138	20.0	—	—	10
6463-T1	≤12.70	≤0.500	≤129	≤20	117	17.0	—	—	62	9.0	—	—	12
6463-T5	≤12.70	≤0.500	≤129	≤20	152	22.0	—	—	110	16.0	—	—	8
6463-T6 和 T62⑤⑥	≤3.15	≤0.124	≤129	≤20	207	30.0	—	—	172	25.0	—	—	8
	3.18 ~ 12.70	0.125 ~ 0.500	≤129	≤20	207	—	—	—	172	25.0	—	—	10
7001-O	全部	全部	全部	全部	—	—	290	42.0	—	—	179	26.0	10
7001-T6，T62⑤⑥，T6510③和 T6511③	≤6.32	≤0.249	全部	全部	614	89.0	—	—	565	82.0	—	—	5
	6.35 ~ 12.67	0.250 ~ 0.499	全部	全部	634	92.0	—	—	579	84.0	—	—	5

（续）

合金及其状态	规定直径或厚度[1]		面积		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[2]（%）
					最小		最大		最小		最大		
	mm	in	cm^2	in^2	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
7001-T6，T62[5][6]，T6510[3]和T6511[3]	12.70～50.77	0.500～1.999	全部	全部	648	94.0	—	—	607	88.0	—	—	5
	50.80～76.17	2.000～2.999	全部	全部	620	90.0	—	—	579	84.0	—	—	5
7005-T53	≤19.05	≤0.750	全部	全部	345	50.0	—	—	303	44.0	—	—	10
7075-O	全部	全部	全部	全部	—	—	276	40.0	—	—	165	24.0	10
7075-T6，T62[5][6]，T6510[3]和T6511[3]	≤6.32	≤0.249	全部	全部	538	78.0	—	—	483	70.0	—	—	7
	6.35～12.67	0.250～0.499	全部	全部	558	81.0	—	—	503	73.0	—	—	7
	12.70～38.07	0.500～1.499	全部	全部	558	81.0	—	—	496	72.0	—	—	7
	38.10～76.17	1.500～2.999	全部	全部	558	81.0	—	—	496	72.0	—	—	7
	76.20～114.27	3.000～4.499	≤129	≤20	558	81.0	—	—	489	71.0	—	—	7
	76.20～114.27	3.000～4.499	>129～206	>20～32	538	78.0	—	—	483	70.0	—	—	6
	114.30～127	4.500～5.000	≤206	≤32	538	78.0	—	—	469	68.0	—	—	6
7075-T73[7]，T73510[3][7]和T73511[3][7]	1.57～6.32	0.062～0.249	≤129	≤20	469	68.0	—	—	400	58.0	—	—	7
	6.35～38.07	0.250～1.499	≤161	≤25	483	70.0	—	—	421	61.0	—	—	8
	38.10～76.17	1.500～2.999	≤161	≤25	476	69.0	—	—	407	59.0	—	—	8
	76.20～114.27	3.000～4.499	≤129	≤20	469	68.0	—	—	393	57.0	—	—	7
	76.20～114.27	3.000～4.499	129～206	20～32	448	65.0	—	—	379	55.0	—	—	7
7075-T76[8]，T76510[3][8]和T76511[3][8]	≤3.15	≤0.124	全部	全部	496	72.0	—	—	47	62.0	—	—	7
	3.18～6.32	0.125～0.249	≤129	≤20	510	74.0	—	—	441	64.0	—	—	7
	6.35～12.67	0.250～0.499	≤129	≤20	517	75.0	—	—	448	65.0	—	—	7
	12.70～25.40	0.500～1.000	≤129	≤20	517	75.0	—	—	448	65.0	—	—	7
	12.70～25.40	0.500～1.000	≤129	≤20	517	75.0	—	—	448	65.0	—	—	7
7178-O	全部	全部	≤206	≤32	—	—	276	40.0	—	—	165	24.0	10

（续）

合金及其状态	规定直径或厚度[1]		面　积		抗拉强度				屈服强度				最小伸长率[2]（%）
					最小		最大		最小		最大		
	mm	in	cm^2	in^2	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
7178-T6，T6510[3]和T6511[3]	≤1.55	≤0.061	全部	全部	565	82.0	—	—	524	76.0	—	—	—
	1.58~6.32	0.062~0.249	≤129	≤20	579	84.0	—	—	524	76.0	—	—	5
	6.35~38.07	0.250~1.499	≤161	≤25	600	87.0	—	—	538	78.0	—	—	5
	38.10~63.47	1.500~2.499	≤161	≤25	593	86.0	—	—	531	77.0	—	—	5
	38.10~63.47	1.500~2.499	>161~206	>25~32	579	84.0	—	—	517	75.0	—	—	5
	63.50~76.17	2.500~2.999	≤206	≤32	565	82.0	—	—	489	71.0	—	—	5
7178-T62[5][6]	≤1.55	≤0.061	全部	全部	545	79.0	—	—	503	73.0	—	—	—
	1.58~6.32	0.062~0.249	≤129	≤20	565	82.0	—	—	510	74.0	—	—	5
	6.35~38.07	0.250~1.499	≤161	≤25	593	86.0	—	—	531	77.0	—	—	5
	38.10~63.47	1.500~2.499	≤161	≤25	593	86.0	—	—	531	77.0	—	—	5
	38.10~63.47	1.500~2.499	>161~206	>25~32	579	84.0	—	—	517	75.0	—	—	5
	63.50~76.17	2.500~2.999	≤206	≤32	565	82.0	—	—	489	71.0	—	—	5
7178-T76[8]，T6510[4][8]和T76511[4][8]	3.18~6.32	0.125~0.249	≤129	≤20	524	76.0	—	—	455	66.0	—	—	7
	6.35~12.67	0.250~0.499	≤129	≤20	531	77.0	—	—	462	67.0	—	—	7
	12.70~25.40	0.500~1.000	≤129	≤20	531	77.0	—	—	462	67.0	—	—	7

注：所换算的国际单位制SI(米制)仅供参考，不作技术指标或判别合格与否之使用。

①获取拉伸试验试件的横截面厚度决定了所适用的力学性能。　②按照50mm(2in)或$4d$。对于依此尺寸无法得到标准试件的材料或厚度小于0.062in的型材，不要求试验伸长率。　③对于应力消除状态的材料除另有规定的以外，其特征和性能都跟以基本状态的相同材料的相应特征和性能会有所不同。　④状态为T3/T31、T3510、T3511、T4、T4510和T4511的材料，经人工时效能分别开发出相应材料状态为T81、T8510、T8511、T6、T6510和T6511的力学性能。　⑤通常用户可以自行通过对这些以O(退火)或F(加工后)状态的材料进行适当的固溶热处理，或固溶并析出热处理获得所列的性能。这些性能还适用于O和F状态的材料样品，由生产厂家对其进行固溶热处理或固溶并析出热处理，以此确定材料经这些适当热处理后的效果。然而如果这些材料在固溶热处理以前曾经过成形或经过冷或热加工，特别是处于退火状态的，则由用户自行得到的性能可能低于表中所列的数值。　⑥这种状态无法由生产厂家提供。　⑦在应力腐蚀试验中，这种状态的材料能够在高度方向承受75%的规定屈服强度的应力达30天，而没有任何应力腐蚀开裂的迹象产生。事先按适用的电导率许用指标选用拉伸试件进行试验，以此确定各批次的耐应力腐蚀的能力。　⑧除非其应力可达到25.0ksi，否则这种状态的材料应按照购方同意的验收方法通过耐剥离腐蚀试验，并达到上面⑦所注明的耐应力腐蚀的指标。事先按适用的电导率许用指标选用拉伸试件进行试验，以此确定各批次经过改善的耐剥离腐蚀和应力腐蚀开裂的能力。

表 3.1-32 铝合金模锻件的力学性能极限值

合金及其状态	规定直径或厚度①		试件轴线平行于晶粒流方向						试件轴线不平行于晶粒流方向					硬度③ HB
			抗拉强度		屈服强度		最小伸长率②（%）		抗拉强度		屈服强度		最小伸长率②（%）（锻件）	
	mm	in	MPa	ksi	MPa	ksi	试样	锻件	MPa	ksi	MPa	ksi		
1100-H112④	≤100	≤4	76	11.0	28	4.0	25	18	—	—	—	—	—	20
2014-T4	≤100	≤4	379	55.0	207	30.0	16	11	—	—	—	—	—	100
2014-T6	≤25	≤1	448	65.0	386	56.0	8	6	441	64.0	379	55.0	3	125
	>25~50	>1~2	448	65.0	386	56.0	⑤	6	441	64.0	379	55.0	2	125
	>50~75	>2~3	448	65.0	379	55.0	⑤	6	434	63.0	372	54.0	2	125
	>75~100	>3~4	434	63.0	379	55.0	⑤	6	434	63.0	372	54.0	2	125
2018-T61	≤100	≤4	379	55.0	276	40.0	10	7	—	—	—	—	—	100
2025-T6	≤100	≤4	359	52.0	228	33.0	16	11	—	—	—	—	—	100
2218-T61	≤100	≤4	379	55.0	276	40.0	10	7	—	—	—	—	—	100
2218-T72	≤100	≤4	262	38.0	200	29.0	8	5	—	—	—	—	—	85
2219-T6	≤100	≤4	400	58.0	262	38.0	10	8	386	56.0	248	36.0	4	100
2618-T61	≤100	≤4	400	58.0	310	45.0	6	4	379	55.0	290	42.0	4	115
3003-H112④	≤100	≤4	97	14.0	34	5.0	25	18	—	—	—	—	—	25
4032-T6	≤100	≤4	359	52.0	290	42.0	5	3	—	—	—	—	—	115
5083-H111④	≤100	≤4	290	42.0	152	22.0	—	14	269	39.0	138	20.0	12	—
5083-H112④	≤100	≤4	276	40.0	124	18.0	—	16	269	39.0	110	16.0	14	—
5456-H112④	≤100	≤4	303	44.0	138	20.0	—	16	—	—	—	—	—	—
6053-T6	≤100	≤4	248	36.0	207	30.0	16	11	—	—	—	—	—	75
6061-T6	≤100	≤4	262	38.0	241	35.0	10	7	262	38.0	241	35.0	5	80
6066-T6	≤100	≤4	345	50.0	310	45.0	12	8	—	—	—	—	—	100
6151-T6	≤100	≤4	303	44.0	255	37.0	14	10	303	44.0	255	37.0	6	90
7075-T6	≤25	≤1	517	75.0	441	64.0	10	7	490	71.0	421	61.0	3	135
	>25~50	>1~2	510	74.0	434	63.0	⑤	7	490	71.0	421	61.0	3	135
	>50~75	>2~3	510	74.0	434	63.0	⑤	7	483	70.0	414	60.0	3	135
	>75~100	>3~4	503	73.0	427	62.0	⑤	7	483	70.0	414	60.0	2	135
7075-T73	≤75	≤3	455	66.0	386	56.0	—	7	427	62.0	365	53.0	3	125
	>75~100	>3~4	441	64.0	379	55.0	—	7	421	61.0	359	52.0	2	125
7075-T7352	≤75	≤3	455	66.0	386	56.0	—	7	427	62.0	352	51.0	3	125
	>75~100	>3~4	441	64.0	365	53.0	—	7	421	61.0	338	49.0	2	125
7175-T74	≤75	≤3	524	76.0	455	66.0	—	7	490	71.0	427	62.0	4	—
7175-T7452	≤75	≤3	503	73.0	434	63.0	—	7	469	68.0	379	55.0	4	—
7175-T7454	≤75	≤3	517	75.0	448	65.0	—	7	483	70.0	421	61.0	4	—

注：换算的国际单位制 SI(米制)仅供参考，不作技术指标或判别合格与否之使用。

①锻造后的厚度。当锻件在热处理之前进行切削加工时，只要切削厚度不大于原始(即锻造后)厚度的一半，此处所列的性能适用于切削后的厚度。 ②按照 50mm(2in)或 $4d$。 ③仅供参考，布氏硬度通常用 500kg 的载荷和 10mm 的压球测定经热处理的锻件表面。 ④状态为 H111 和 H112 的锻件的性能取决于与其锻件相当的冷变形加工。在指定厚度范围里的任何锻件都应该达到所列的性能，有时候还可以大大超过。 ⑤当使用分离锻造的试件验证所示厚度锻件的合格与否时，所示厚度达 1in 的性能包括试样的伸长率在内均可适用。

表3.1-33　几种高强度铝合金的最小和一般室温下的平面应变断裂韧度值

产品形式	合金及其状态	厚　度		平面应变断裂韧度(K_{Ic})											
				L-T方向①				T-L方向②				S-L方向③			
				最小		典型		最小		典型		最小		典型	
		mm	in	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
厚板	7050-T7451	25.40～50.80	1.000～2.000	31.9	29.0	37	34	27.5	25.0	33	30	—	—	—	—
		50.83～76.20	2.001～3.000	29.7	27.0	36	33	26.4	24.0	32	29	23.1	21.0	28	25
		76.23～101.60	3.001～4.000	28.6	26.0	35	32	25.3	23.0	31	28	23.1	21.0	28	25
		101.63～127.00	4.001～5.000	27.5	25.0	32	29	24.2	22.0	29	26	23.1	21.0	28	25
		127.03～152.40	5.001～6.000	26.4	24.0	31	28	24.2	22.0	28	25	23.1	21.0	28	25
	7050-T7651	25.40～50.80	1.000～2.000	28.6	26.0	34	31	26.4	24.0	31	28	—	—	—	—
		50.83～76.20	2.001～3.000	26.4	24.0	—	—	25.3	23.0	—	—	22.0	20.0	26	24
	7475-T651			33.0	30.0	46	42	30.8	28.0	41	37	—	—	—	—
	7475-T7651			36.3	33.0	47	43	33.0	30.0	41	37	—	—	—	—
	7475-T7351			41.8	38.0	55	50	35.2	32.0	45	41	27.5	25.0	36	33
	7075-T651			—	—	29	26	—	—	25	23	—	—	20	18
	7075-T7651			—	—	30	27	—	—	24	22	—	—	20	18
	7075-T7351			—	—	32	30	—	—	29	26	—	—	20	18
	7079-T651			—	—	30	27	—	—	25	23	—	—	18	16
	2124-T851			26.4	24.0	32	29	22.0	20.0	26	24	19.8	18.0	26	24
	2024-T351			—	—	37	34	—	—	32	29	—	—	26	24
模锻件	7050-T74，T7452			27.5	25.0	38	35	20.9	19.0	32	29	20.9	19.0	29	26
	7175-T736，T73652			29.7	27.0	38	35	23.1	21.0	34	31	23.1	21.0	31	28
	7075-T7352			—	—	32	29	—	—	30	27	—	—	29	26
手工锻件	7050-T7452			29.7	27.0	36	33	18.7	17.0	28	25	17.6	16.0	29	26
	7075-T73，T7352			—	—	42	38	—	—	28	25	—	—	28	25
	7175-T73652			33.0	30.0	40	36	27.5	25.0	30	27	23.1	21.0	28	25
	2024-T852			—	—	26	24	—	—	22	20	—	—	20	18
挤制件	7050-T7651x			—	—	44	40	—	—	31	28	—	—	28	25
	7050-T7351x			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	7075-T651x			—	—	34	31	—	—	22	20	—	—	20	18
	7075-T7351x			—	—	33	30	—	—	26	24	—	—	22	20
	7150-T7351x			24.2	22.0	31	28	—	—	—	—	—	—	—	—
	7175-T7351x			33.0	30.0	40	36	30.8	28.0	34	31	—	—	—	—

①L-T，裂纹平面及生长方向垂直于轧制方向。　②T-L，裂纹平面及生长方向平行于轧制方向。　③S-L，高度向断裂韧度。

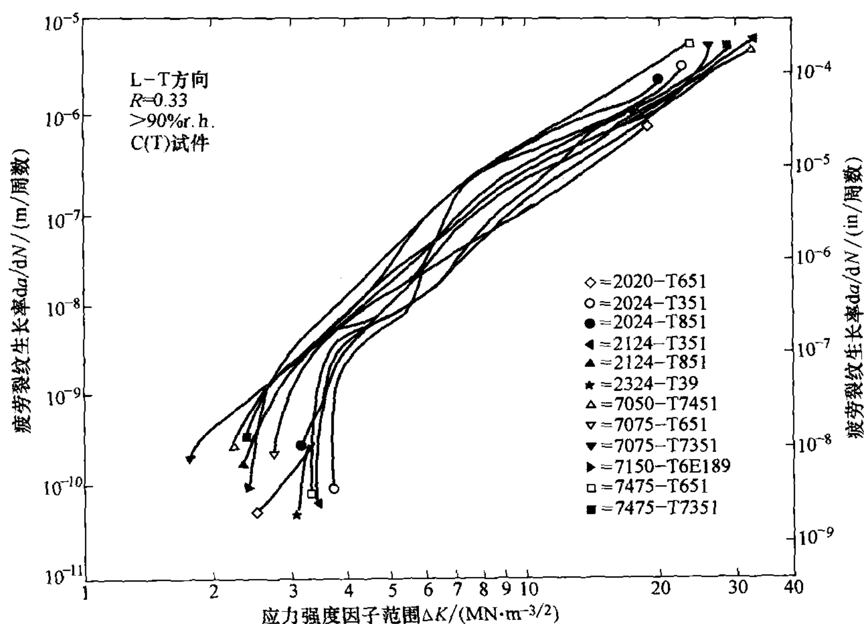


图3.1-29 不同显微组织对疲劳裂纹增长率微小影响的曲线：数据取自不同热处理的12种2*xxx*和7*xxx*铝合金

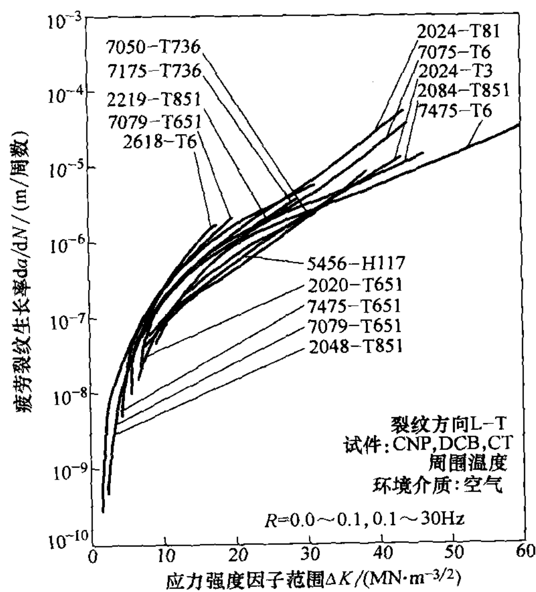


图3.1-30 裂纹增长比较。图示工业铝合金表明相似的裂纹在空气中的疲劳扩张率

表3.1-34　铝-锂合金2090的拉伸性能和断裂韧度

2090状态	厚度		技术标准	方向①	拉伸性能					韧性		
					抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	方向②和 K_c 或 K_{Ic}③	K_{Ic} 或 K_c	
	mm	in			MPa	ksi	MPa	ksi			MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
薄板												
T83	0.8~3.175	0.032~0.125	AMS 4351	L	530 (550)	77 (80)	517 (517)	75 (75)	3(6)	L-T(K_c)	(44)④	(40)④
				LT	505	73	503	73	5	—	—	—
				45°	440	64	440	64	—	—	—	—
	3.2~6.32	0.126~0.249		L	483	70	483	70	4	—	—	—
				LT	455	66	455	66	5	—	—	—
				45°	385	56	385	56	—	—	—	—
T84	0.8~6.32	0.032~0.249	AMS 草案 D89	L	495 (525)	72 (76)	455 (470)	66 (68)	3(5)	L-T(K_c)	49 (71)④	45 (65)④
				LT	475	69	415	60	5	T-L(K_c)	49④	45④
				45°	427	62	345	50	7	—	—	—
T3⑤	—	—	⑥	LT	317 最小	46 最小	214 最小	31 最小	6 最小	—	—	—
O	—	—	⑥	LT	213 最大	31 最大	193 最大	28 最大	11 最小	—	—	—
7075-T6	—	—	—	L	(570)	(83)	(517)	(75)	(11)	L-T(K_c)	(71)④	(65)④
挤制料												
T86⑦	0.0~3.15⑧	0.000~0.124⑧	AMS 草案 D88BE	L	517	75	470	68	4	—	—	—
	3.175~6.32⑧	0.125~0.249⑧		L	545	79	510	74	4	—	—	—
	6.35~12.65⑧	0.250~0.499⑧		L	550	80	517	75	5	—	—	—
				LT	525	76	483	70	—	—	—	—
厚板												
7075-T6	—	—	—	L	(565)	(82)	(510)	(74)	(11)	L-T(K_{Ic})	(27)	(25)
T81	13-38	0.50-1.50	AMS 4346	L	517 (550)	75 (80)	483 (517)	70 (75)	4(8)	L-T(K_{Ic})	≥27 (71)	≥25 (65)
				LT	517	75	470	68	3	L-T(K_{Ic})	≥22	≥20

注：括号里的是典型值。合金7075-T6的数据列入供比较用。

①L，纵向；LT，宽度。　②L-T，裂纹平面和方向垂直于金属变形加工的主方向(轧制或挤压)；T-L，裂纹平面和方向平行于金属加工的方向。　③K_c，平面应力断裂韧度；K_{Ic}，平面应变断裂韧度。　④405×1120mm(16×44in)面板的韧性极限值，依据的是有限的数据和典型值(括号内)。　⑤T3状态可经时效成为T83或T84状态。　⑥无最终用户的技术指标。⑦要求向铝业协会注册。　⑧公称直径或最小厚度(棒料、圆棒、线材和型材)或公称壁厚(管材)。

表 3.1-35　铝-锂合金的拉伸性能和断裂韧度

状态	产品形式	晶粒组织①	方向	最小和典型②拉伸性能：抗拉强度 MPa	抗拉强度 ksi	0.2% 屈服强度 MPa	0.2% 屈服强度 ksi	50mm(2in)长的伸长率(%)	最小和典型②断裂韧度值：断裂方向和韧性类型 K_c 或 K_{Ic}③	韧度值② MPa·m$^{1/2}$	韧度值② ksi·in$^{1/2}$
8090-T81（时效不足）	耐损伤裸薄板 <3.55mm (0.140in)厚	R	纵向	345 ~ 440	50 ~ 64	295 ~ 350	43 ~ 51	8 ~ 10 典型	L-T(K_c)	94 ~ 165	86 ~ 150
			宽度	385 ~ 450	56 ~ 65	290 ~ 325	42 ~ 47	10 ~ 12	T-L(K_c)	85 最小	77 最小
			45°	380 ~ 435	55 ~ 63	265 ~ 340	38.5 ~ 49	14 典型	S-L(K_c)	—	—
8090-T8X（最大时效）	中等强度薄板	UR	纵向	470 ~ 490	68 ~ 71	380 ~ 425	55 ~ 62	4 ~ 5	L-T(K_c)	75 典型	68 典型
			宽度	450 ~ 485	65 ~ 70	350 ~ 440	51 ~ 64	4 ~ 7	T-L(K_c)	—	—
			45°	380 ~ 415	55 ~ 60	305 ~ 345	44 ~ 50	4 ~ 11	S-L(K_c)	—	—
8090-78X	中等强度薄板	R	纵向	420 ~ 455	61 ~ 66	325 ~ 385	47 ~ 56	4 ~ 8	L-T(K_c)	—	—
			宽度	420 ~ 440	61 ~ 64	325 ~ 360	47 ~ 52	4 ~ 8	T-L(K_c)	—	—
			45°	420 ~ 425	61 ~ 62	325 ~ 340	47 ~ 49	4 ~ 10	S-L(K_c)	—	—
8090-T8771，8090-T651（最大时效）	中等强度厚板	UR	纵向	460 ~ 515	67 ~ 75	380 ~ 450	55 ~ 65	4 ~ 6 最小	L-T(K_{Ic})	20 ~ 35	18 ~ 32
			宽度	435 最小	63 最小	365 最小	53 最小	4 最小	T-L(K_{Ic})	13 ~ 30	12 ~ 27
			高度	465 典型	67 典型	360 典型	52 典型	—	S-L(K_{Ic})	16 典型	14.5 典型
			45°	420 最小	61 最小	340 最小	49 最小	1 ~ 1.5 最小			
8090-T8151（时效不足）	耐损伤厚板	UR	纵向	435 ~ 450	63 ~ 65	345 ~ 370	50 ~ 54	5 最小	L-T(K_{Ic})	35 ~ 49	32 ~ 45
			宽度	435 最小	63 最小	325 最小	47 最小	5 最小	T-L(K_{Ic})	30 ~ 44	27 ~ 40
8090-T852	冷变形加工或手工锻件	UR	纵向	425 ~ 495	62 ~ 72	340 ~ 415	49 ~ 60	6 ~ 8	L-T(K_{Ic})	30 典型	27 典型
			宽度	405 ~ 475	59 ~ 69	325 ~ 395	47 ~ 57	3 ~ 6	T-L(K_{Ic})	20 典型	18 典型
			45°	405 ~ 450	59 ~ 65	305 ~ 395	44 ~ 57	2 ~ 6	S-L(K_{Ic})	15 典型	14 典型
8090-T8511，8090-T6511	挤压件	UR	纵向	460 ~ 510	67 ~ 74	395 ~ 450	57 ~ 65	3 ~ 6	—	—	—

①R，再结晶；UR，非再结晶。　②除只规定最小或典型以外，凡给出数值范围的均代表一种性能的最小及其典型数值。最小值是由不同的客户和国家标准提出来的，并没有统一的登记注册。　③K_c，平面应力断裂韧度；K_{Ic}，平面应变断裂韧度。

第7节 铸造铝产品

铸造铝合金是所有普通铸造合金中应用最广泛的，一般具有最高的可铸造性能。作为铸造铝合金，具有以下优良特性：

- 有良好的流动性，以便能充满很薄的截面；
- 相对许多其他金属，其要求的熔点低；
- 从熔化铝到铸型的传热快，以此获得较短的铸造周期；
- 氢气是在铝和铝合金中惟一具有良好溶解度的气体，而氢溶解度能容易地通过工艺方法予以控制；
- 许多铝合金相对较少发生热脆开裂和撕裂的倾向；
- 化学稳定性；
- 良好的铸造表面，具有光泽的表面和很少或没有的瑕疵。

铝合金铸件可以在成本效益方面满足机器、设备、器具、车辆和构件的许多制造上的需求及其问题的解决，通常不仅能满足基本的力学性能，还常常能将其与外观或装饰功能相结合。这就要求铸造零件能有大量形态各异的几何形状，经常将多种不同的基本形状组合在一起成为一个整体或单件。这些零件包括机盖和机壳，它们可以做成带加强肋，或带导热或散热的叶片；还有框架和箱体零件、圆柱形或球形的气体或液体储罐、支架、活塞、飞轮、盘形零件、螺旋桨、隔板以及夹头。这些零件的种类不胜枚举，并且许多这类零件都有带凸台的孔，用于紧固或作为流体的通道。

铸造工艺

铝合金铸件的常规生产方法有压铸、金属型铸造、湿砂和干砂造型铸造、熔模铸造以及石膏模铸造。铝合金还便于采用真空、低压、离心和与其模型有关的工艺，如消失模铸造。

压铸。这是一种用于产量最大的铸造工艺，熔化金属以高达140MPa(20ksi)的压力被注入用经热处理的钢模和型芯制造成的型腔里。零件的大小仅受设备的能力所限制，一些的设备生产铸件重量的能力超过50kg(100lb)，尽管5kg以下的铸件更为普遍。其铸造表面非常光滑和精细，一般只有与其他零件的配合或密封的表面需要切削加工。压铸可以比砂型或金属型铸造获得壁厚更薄的金属截面。由于通过快速凝固形成细微的显微组织，所以压铸件无需热处理就能形成高力学性能和高耐疲劳性。

压铸最常用的合金在成分上与用其他铸造工艺的合金有所不同，因为细微的压铸显微组织含有的第二相组分、硅和金属间化合物具有较高的体积比，故不会对塑性或耐冲击性造成有害的影响。高达接近1%的铁含量会削弱一些凝固速度很慢的铸件的强度和塑性，但是它对于压铸件的成分却十分有利，可以将铝在钢模上“凝焊”或粘附的可能性降到最低限度。普通的压铸铝合金及其典型的应用包括：

合金 308.0	割草机机壳、齿轮箱和空冷发动机的缸盖
合金 A308.0	路灯座、打字机机框架和牙科用设备
合金 360.0	平底煎锅、盖板、仪表壳和要求耐腐蚀的零件
合金 413.0	舷外安装电动机的零件，如活塞、连杆和壳体
合金 518.0	电梯零件、输送机的零件、飞机和船舰零件和配件

金属型铸造。利用重力或低压使熔化金属注入金属型和型芯。大部分的金属型铸件的重量都小于10kg(20lb)，但重量高达25kg(50lb)有时甚至达到100kg(200lb)也不罕见。金属型铸件具有比砂型铸件较为光滑的表面，还表现出良好的压力致密性。锥形的金属型芯用于形成直壁的内腔；可伸缩的金属型芯用于形成内部的筋肋和下部的凹槽，它们也可以用一次性的型芯(干砂或塑料)构成。当使用塑料型芯时，其工艺也就是所谓的半永久模铸造(金属型是一种永久模铸造——译者注)。金属型铸件的力学性能(包括耐疲劳性)是非常高的，因为它们具有很细的显微组织和可热处理性。

下表列出一些普通的金属型铸件合金和用以铸造的典型产品：

合金 336.0	汽车活塞
合金 335.0，C355.0，A357.0	正时齿轮、螺旋桨、压缩机及要求高强度的飞机和导弹零件
合金 356.0，A356.0	机床零件、飞机起降轮、泵零件、船舰硬件、阀体
合金 B443.0	化油器体、对开式铁心
合金 513.0	装饰用五金和建筑用配件

其他常用于金属型铸件的铝合金包括296.0、319.0和333.0。金属型铸造的技术指标的对照见表3.1-36。

表3.1-36　铝合金的砂型和金属型(PM)铸造的常用技术指标对照表

合金		联邦		ASTM①		SAE②	AMS或MIL-2118c
铝业协会编号	曾用代号	QQ-A-601E(砂型)	QQ-A-596d(金属型)	B26(砂型)	B108(金属型)		
208.0	108	108	—	CS43A	CS43A	—	—
213.0	C113	—	113	CS74A	CS74A	33	—
222.0	122	122	122	CG100A	CG100A	34	—
242.0	142	142	142	CN42A	CN42A	39	4222
295.0	195	195	—	C4A	—	38	4231
296.0	B295.0	—	B195	—	—	380	—
308.0	A108	—	A108	—	—	—	—
319.0	319，Allcast	319	319	SC64D	SC64D	326	—
328.0	RedX-8	RedX-8	—	SC82A	—	327	—
332.0	F332.0	—	F132	—	SC103A	332	—
333.0	333	—	333	—	—	—	—
336.0	A332.0	—	A132	—	SN122A	321	—
354.0	354	—	—	—	—	—	C354③
355.0	355	355	355	SC51A	SC51A	322	4210
C355.0	C355	—	C355	—	SC51B	355	C355③
356.0	356	356	356	SG70A	SG70A	323	④
A356.0	A356	—	A356	—	SG70B	336	A356③
357.0	357	—	357	—	—	—	4241
A357.0	A357	—	—	—	—	—	A357③
359.0	359	—	—	—	—	—	359③
B443.0	43	43	43	S5A	S5A	—	—
512.0⑤	B514.0	B214	—	GS42A	GS42A	—	—
513.0	A514.0	—	A214	—	GZ42A	—	—
514.0	214	214	—	G4A	—	320	—
520.0	220	220	—	G10A	—	324	4240
535.0	Almag 35	Almag 35	—	GM70B	GM70B	—	4238
705.0	603，Ternalloy 5	Ternalloy 5	Ternalloy 5	ZG32A	ZG32A	311	—
707.0	607，Ternalloy 7	Ternalloy 7	Ternalloy 7	ZG42A	ZG42A	312	—
710.0	A712.0	A612	—	ZG61B	—	313	—
712.0	D712.0	40E	—	ZG61A	—	310	—
713.0	613，Tenzaloy	Tenzaloy	—	ZC81A	—	315	—
771.0	Precedent 71A	Precedent 71A	—	—	—	—	—
850.0	750	750	750	—	—	—	—
851.0	A850.0	A750	A750	—	—	—	—
852.0	B850.0	B750	B750	—	—	—	—

①曾用编号。1974年，ASTM采用铝业协会的代号系统。　②用于SAE技术标准J452和/或J453的旧代号。1990年，SAE J452采用ANSI/铝业协会的合金编号系统。SAE J453—1986也按超码编为SAE J452。　③MIL-2118c中的代号。　④合金356.0是在AME4217、4260、4261、4284、4285和4286中所规定的。　⑤合金512.0不再有用，其存在仅供参考。

砂型铸造。不管怎么说，砂型铸造还是应用最广的铸造方法，而且对于能采用的合金种类、适用的零件尺寸或形状，以及为形成内腔和通道而选择的型芯形状、大小几乎都没有限制。这种工艺应用于相对大型的零件，尤其当要求生产的零件数量较少，或因设计或合金的要求而需使用一种消耗性铸型材料的时候。对其大小和重量的限制，一般取决于熔化、金属或铸型的处置能力。重量超过 9000kg(18000lb) 且尺寸 5.5m(18ft) 以上的砂型铸件都能生产。铸造表面比其他方法粗糙，所要求的尺寸公差也更大一些。由于具有高强度性能的非热处理和可热处理的两种合金都能适用，故其力学性能是一种全范围的。

几种利用普通的砂型铸造铝合金所生产的典型产品包括：

合金 C355.0	空气压缩机配件、曲轴箱和齿轮箱
合金 A356.0	汽车变速箱箱体、油底壳和后桥壳体
合金 357.0	泵体和用于水冷发动机的缸体
合金 443.0	管线接头、厨房器皿和船用装饰性附件
合金 520.0	飞机配件、货车及大客车的框架零件、杠杆和支架
合金 713.0	铸造合金的一般性用途，要求强度且不用进行热处理或硬钎焊

其他常用于砂型铸造的铝合金包括 319.0、355.0、356.0、514.0 和 535.0。砂型铸造的技术指标的对照见表 3.1-36。

壳型铸造。在这种造型工艺中，其型腔是由树脂粘结的砂型壳体所构成的，厚度只有 10 ~ 20mm (0.4 ~ 0.8in)——比普通砂型铸造中使用的实体铸型薄很多，也轻很多。壳型铸造在表面粗糙度和尺寸精度方面都优于普通砂型铸造，其冷却速度也稍高一些。其设备成本比较高，而且所能生产的铸件大小和复杂度也多有限制。

石膏型铸造和熔模铸造。这两种工艺能生产形状复杂、截面壁薄的零件，并且具有很高的尺寸精度，可清晰地复制精细结构且有非常光滑的表面。大部分用这种方法生产的铸件都很小，并为薄壁截面。其他的铸型材料或复合铸型一般都要求为薄壁铸件提供适当的冷却。

复合铸造。复合铸造的基本特点就是其铸型使用不止一种，并具有不同热收缩（冷却）能力的材料。铸型材料的配置能使铸件从其一部分到另一部分的凝固过程得到优化，从而提高铸件的完整性和强度，而且其尺寸也得到很好的控制。

消失(失泡)模铸造(EPC)。这是一种利用非粘结砂型的铸造工艺，在其型腔内部安置着一种可消失的聚苯乙烯模型。这种工艺与熔模铸造同工异曲，可将一种能熔化消失的发泡材料制成能在包围它的铸型材料里面形成较复杂型腔的模型。与熔模不一样，EPC 作为聚苯乙烯发泡模型，当熔化金属注入由非粘结的型砂包围而成的铸型里时，会发生汽化而消失。而作为熔模铸造，把石蜡或塑料模型固结在陶瓷铸型里，在熔化金属注入型腔之前需要通过加热将其去除。

离心铸造。形如管状的一类轴对称零件有时可以通过在金属型里的精准离心浇铸进行生产。对于非对称形状的零件，可借助离心作用使熔化金属充满型腔。这种工艺通常将多个型腔围绕安置于一条中央浇道上。

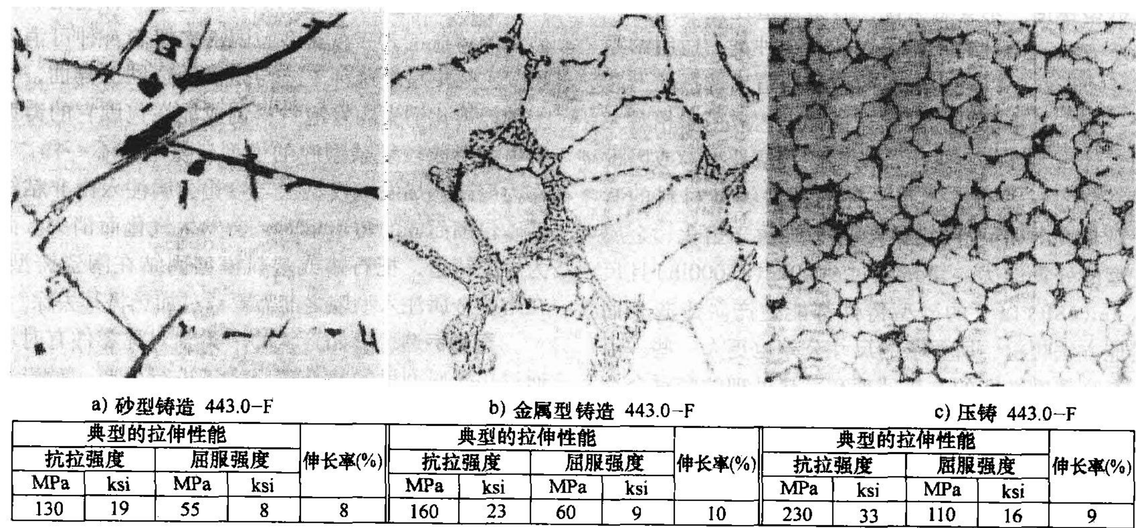
连续铸造。连续浇铸用于生产截面简单的长型材（如圆、方和六角形的棒材），也就是使用短的、无底的和水冷的金属铸型进行生产。铸件从铸型的底部连续地拉出来，因为铸型用的是水冷，故冷却速率非常高。由于连续的注入，其铸件一般没有疏松。但是在大多数情况里，同样的产品也可以用挤压的方法生产，其成本相同，却性能更好，所以连续浇铸的应用也就受到了限制。连续浇铸的最大用途是提供轧制、挤压和锻造用的铸锭。

混合金属型工艺。它包括挤压铸造（液态金属锻造）和半固态铸造两种。两种方法都具有生产净形状的能力，但是所生产零件的力学性能比金属型铸造好得多，并接近锻件的性能。现在已经能用这种方法生产材料为合金 356 和 357 的汽车零件。

铸造工艺的选择

有许多因素影响生产特定零件的铸造工艺的选择。在很多情况下，其工艺受几何形状和设计特征的影响，并由它们决定了不同工艺的可行性。当铸件能够用若干种方法生产时，其相对重量、产量要求以及单个成本常是决定性的。选择还取决于质量因素，如完整性、压力致密性、表面粗糙度、切削加工要求、力学性能、使用的环境条件，或者特殊的安装、装配或连接（如焊接或硬钎焊）条件。设计者与生产人员之间的密切合作对于形成设计与工艺之间的结合，并由此获得最佳成本效益是至关重要的。就像所有的采购一样，可行性和交货有时会成为其主要因素。

表 3.1-37 就主要技术参数对砂型铸造、金属型铸造和压铸的三种基本工艺进行了比较。图 3.1-31 所示是 Al-5% Si 合金(443.0 型)用这三种工艺生产的显微组织及相应的典型拉伸性能的比较。它们之间的这些差别将是工艺选择中的重要因素。



a) 砂型铸造 443.0-F

典型的拉伸性能				
抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)
MPa	ksi	MPa	ksi	
130	19	55	8	8

b) 金属型铸造 443.0-F

典型的拉伸性能				
抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)
MPa	ksi	MPa	ksi	
160	23	60	9	10

c) 压铸 443.0-F

典型的拉伸性能				
抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)
MPa	ksi	MPa	ksi	
230	33	110	16	9

图3.1-31 Al-5%Si合金(443.0型)由三种工艺的不同凝固速率特点而形成的显微组织。枝晶大小和组分颗粒大小随冷却速率从砂型铸造、金属型铸造到压铸依次提高而减小。腐蚀剂是0.5%氢氟酸，500×

表3.1-37 影响铝合金的铸造工艺选择的因素

因　　素	铸造工艺		
	砂型铸造	金属型铸造	压　　铸
设备成本	如只有数件产量要求，则成本最低	低于压铸	最高
铸造速率	最低	一般11kg/h(25lb/h)还能再高	一般4.5kg/h(10lb/h)，可能达45kg/h(100lb/h)
铸件尺寸	所有方法中最大	受机器尺寸限制	受机器尺寸限制
外部和内部形状	最适合于有型芯要求的复杂形状	能用简单的砂芯，但将其插入比砂型困难	型芯必须能拉出，因为是金属的，下凹槽只能用可收缩芯或用活片芯
最小壁厚	一般3.0~5.0mm(0.125~0.200in)	要求3.0~5.0mm(0.125~0.200in)，一般为3.5mm(0.140in)	1.0~2.5mm(0.040~0.100in)，取决于铸件大小
型芯类别	能使用复杂的烘烤砂芯	用钢制作的可重复使用，或非重复使用的烘烤芯	钢芯，必须简单而又是直形的，才能拉出
能达到的公差	最差，最佳直线度公差为300mm/m(300mil/in)	最佳直线度公差为10mm/m(10mil/in)	最佳直线度公差为4mm/m(4mil/in)
表面粗糙度	6.5~12.5μm(250~500μin)	4.0~10μm(150~400μin)	1.5μm(50μin)，三种工艺中最佳
气孔疏松度	好的技术可以达最低疏松度	最佳压力致密度，好的技术可达低疏松度	会有疏松度存在
冷却速率	0.1~0.5℃/s(0.2~0.9°F/s)	0.3~1.0℃/s(0.5~1.8°F/s)	50~500℃/s(90~900°F/s)
晶粒大小	粗	细	表面非常细

（续）

因素	铸造工艺		
	砂型铸造	金属型铸造	压铸
强度	最低	优	最高，通常用于铸造状态
疲劳性能	好	好	优
耐磨性	好	好	优
外观质量	决定于造型技术	质量最好	公差和重复性都非常好
备注	尺寸、形状和内部形状都非常通用	—	用于高生产率极佳

因为工艺装备的折旧成本，所以单件成本与其产量有关。一般来说，工装(模样、铸型、模具和辅助设备)投资越低，其单件生产的成本也越高。当产品只有数件的产量要求时，工装最便宜的方法将导致单件工装成本为最低，尽管其每一件的铸造成本还是高的。对于大批量生产，其工装成本由大量的铸件分摊，通过使用较精巧的工装有效降低单一铸件的成本，对于初始投资是十分重要的。一种小零件用不同的铸造工艺(砂型、金属型、压铸和熔模)以及用模锻按照不同数量要求进行生产的单件成本的一般性分析如图3.1-32所示。

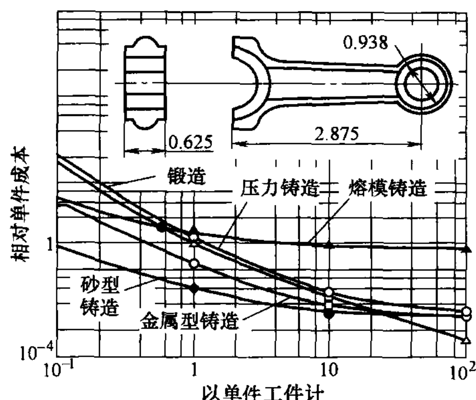


图3.1-32 用四种铸造工艺及锻造工艺生产不同产量的小连杆所发生的单件成本。为工艺所提供的工装成本和产量要求都是假设的。尺寸单位为 in

设计和功能。铸件在机械功能上的设计目标就是防止由于正常运行的载荷和应力再加上万一因误操作和意外事故所引起的载荷和应力而造成的机器损坏。可以利用一些适用于任何金属零件在受力上的基本原理，例如避免锐角及其他引起应力集中的结构特征。截面在厚度上的变化必须是缓和过渡，必须避免厚度的大幅度变化。由于为薄截面所阻隔而无法对厚截面进行“补缩”，会造成内部缺损或表面皱缩。每一种工艺一般都有其适用的最小截面厚度要求，这些要求跟随截面面积及其周围结构的特点而变化。如前所述，除了总结在设计、可生产性和质量方面的经验外，别无其他捷径可循，在铸件的设计过程中，早些向铸造人员请教将能节省时间并能减少许多困难。

铸件质量。当将“质量”一词用于铸件时，它蕴含着许多特征，包括所要求的形状和尺寸的再现精准度、表面的连续性和光滑度以及完好程度(指没有裂纹、疏松和表面缺陷)。这些质量特征受设计、铸造工艺、合金和造型工艺规程及其管理的影响。金相显微组织高度依赖于凝固的局部速度，并且从铸件的一部分到另一部分明显地存在着变化。凝固的速度取决于截面厚度和铸型或模具吸热(冷却)能力，而这种能力又取决于两个因素——铸型或模具的材料和凝固金属与型腔表面之间热接触的持续程度。这显然与工艺有关，因为不仅铸型材料，就连金属在型腔中的压力都随工艺而异。因此，凝固速度按以下顺序提高：石膏型铸造、砂型铸造、金属型铸造、离心铸造和压铸。表3.1-37列出了一些名义冷却速度。

晶粒可以通过提高冷却速度得以再细化，但晶粒的再细化又高度依赖于合金中晶粒细化元素(主要为钛和硼)的存在。更重要的是凝固速度决定了显微组织的细化度——即枝晶的大小和间距以及第二相组分颗粒的大小和分布。枝晶臂间距的相对值(DAS)，即金相图片中最容易测量和定量的特征，与组分的大小和影响强度、塑性的因素紧密相关。在表3.1-37中列出了三种铸造工艺(砂型铸造、金属型铸造和压铸)的名义DAS值(原文如此——译者注)，而图3.1-31给出了合金443.0-F的力学性能与显微组织间的相关性。

一般来说，铸造铝中会发生两种类型的疏松：气孔疏松和收缩疏松。一般呈现为类似球状化的气孔疏

松是由于在凝固过程中析出的氢气(因为这种气体在熔化金属里的溶解度远大于在固体金属中的溶解度),或由于在熔化金属高速注射过程中,压铸件内部产生的夹杂气泡所造成的。另一种造成疏松的原因是从液态到固态的收缩,它常在枝晶间以空穴分布的形式而存在。这些空穴能被氢气扩张,并且由于较慢的凝固而造成较大的枝晶,故疏松度的大小随凝固速度的降低而增大。对于不同工艺预计产生的疏松度,仅就工艺本身做出评估是不全面的,因为用任何方法所生产的铸件,在其致密性方面——从接近完全致密到非常不致密——都会根据其铸件大小、设计以及造型技术的差异而有相当大的不同。

铸件质量的所有方面都要受合金成分的显著影响,并且每一种工艺都力求以最有效的方式进行操作,以便在生产特定的合金或特定类型的合金中达到最高生产率和最高质量。正是基于这方面的经验,各种合金都会在砂型铸造、金属型铸造或压铸中选用一种作为其主要铸造方法。也有些合金可以用几种(或所有)工艺。

合金系统

铸造铝合金所依属的合金系统与锻压铝合金的是一样的,并且以相同的机制进行强化(应变硬化一般为例外),也类似地划分为非热处理的和可热处理的两大类型。主要区别是应用量最大的铸造合金里硅的含有量远超过大部分锻压合金里的含有量。

作为某些种类的用途而言,对于合金的选择纯粹是为了满足功能要求。例如,对于一些以高电导率为基本要求的用途来说,如电动机转子的压铸整体导电棒和集电环,只能使用 1*xx.x* 的非合金铝制品。对于需要最强的耐腐蚀性的船舰和暴露在海水介质中的用途,则要求使用 5*xx.x* 铝-镁合金,它们还能用于许多装饰性的、光亮表面或食物处理设备的用途。

2*xx.x* 铝-铜组含有在所有铸造合金中具有最高强度的成分,这些合金应用于对强度有特别要求的用途里。这些合金(A201.0、202.0、204.0 和 A206.0)含有(质量分数)4%~6% 的 Cu 和 0.25%~0.35% 的 Mg,以及严格限制的杂质(铁和硅)极限值,在某些情况下还含有(质量分数)0.25%~0.35% 的 Mn 或 Cr 和(在合金 201.0、A201.0 和 202.0)0.7% 的 Ag。好的铸件设计和造型技术必须能使这些合金的力学性能得到充分的发挥并始终保持其高质量。

2*xx.x* 合金在所有的铸造合金中具有高温(达 300℃或 600 ℉)下的最高强度和硬度,以此导出它们在某些用途上的应用。如一些含铜量较高、*w*(Mg)高达 2%(在合金 240.0 中为 6%)以及加入锰、镍、钒和/或锆的合金 222.0、224.0、238.0、240.0、242.0 和 243.0,都是一些主要应用于高温的合金。

2*xx.x* 合金要求借助热处理形成最高的强度和塑性,并且必须应用适当,以确保其耐应力腐蚀开裂。这种合金的一般耐腐蚀性低于其他种类的铸造合金,故在一些关键用途里需要表面涂层保护。

7*xx.x* 铝-锌-镁合金的优势在于它们良好的精加工特征、良好的耐腐蚀性以及无需热处理只需通过自然时效就能得到高强度的综合性能。8*xx.x* 铝-锡合金是一种具有适应特殊用途的成分,应用于滑动轴承和轴套。

几乎所有 2*xx.x*、5*xx.x*、7*xx.x* 和 8*xx.x* 组中的合金,在生产具有良好的材料利用率和质量的各种铸造外形方面都要受限制。所以,为了用这些合金生产质量最好的铸件,比起含有较高含硅量的 3*xx.x* 和 4*xx.x*,对它们的铸型设计应给予更多的用心和适应。

硅确实是一种能使大批量生产的铸铝工业更具商品化价值的合金元素。硅含量从 4% 到共晶含量的 12%,以降低其废品损失,从而有可能生产有较大截面厚度变化的、结构较为复杂的产品,而且生产出的铸件其表面和内部均有很高的质量。这些优点均得益于硅能提高流动性、减少裂纹并改善其注入,使收缩疏松降低到最小程度。

图 3.1-33 所示是二元铝-硅系统的完整相图。这是一个简单的仅具有存在端际有限溶解度的共晶系统,它是分析 4*xx.x* 合金的基础。纯组分和几种中间成分都各显其典型的金相组织图。其中间成分合金是含有(质量分数)近 1% Si 的铝固溶体,并作为连续相与主要为纯硅颗粒组成的混合物。$w(Si) < 12\%$ 的合金为“亚共晶”,$w(Si)$ 接近 12% 的为“共晶”,而 $w(Si) > 12\%$ 的合金为“过共晶”。

在铸造中,耐开裂性的形成是借助于一个小的凝固温度范围,即从 $w(Si)$ 1% 的约 78℃(140 ℉)降低到约 $w(Si)$ 12% 的 0℃。能将收缩疏松降到最小限度的易充型特性得益于凝固体积比对温度的一种曲线形态,要让曲线趋向温度范围中较低的部分——即促使共晶增加。铸件在二元系统的非平衡条件下,当含硅量从 1%~12% 时,其共晶体积比随之从接近 0 线性地增大到 1。

按最高使用量的合金属于 3*xx.x* 组,它们除硅以外还含有镁、铜或两者兼有,在特定情况下还要补充镍或铍。一般来说,它们分为三种类型:Al-Si-Mg、Al-Si-Cu、Al-Si-Cu-Mg。硅的含量范围为 5%~22%。

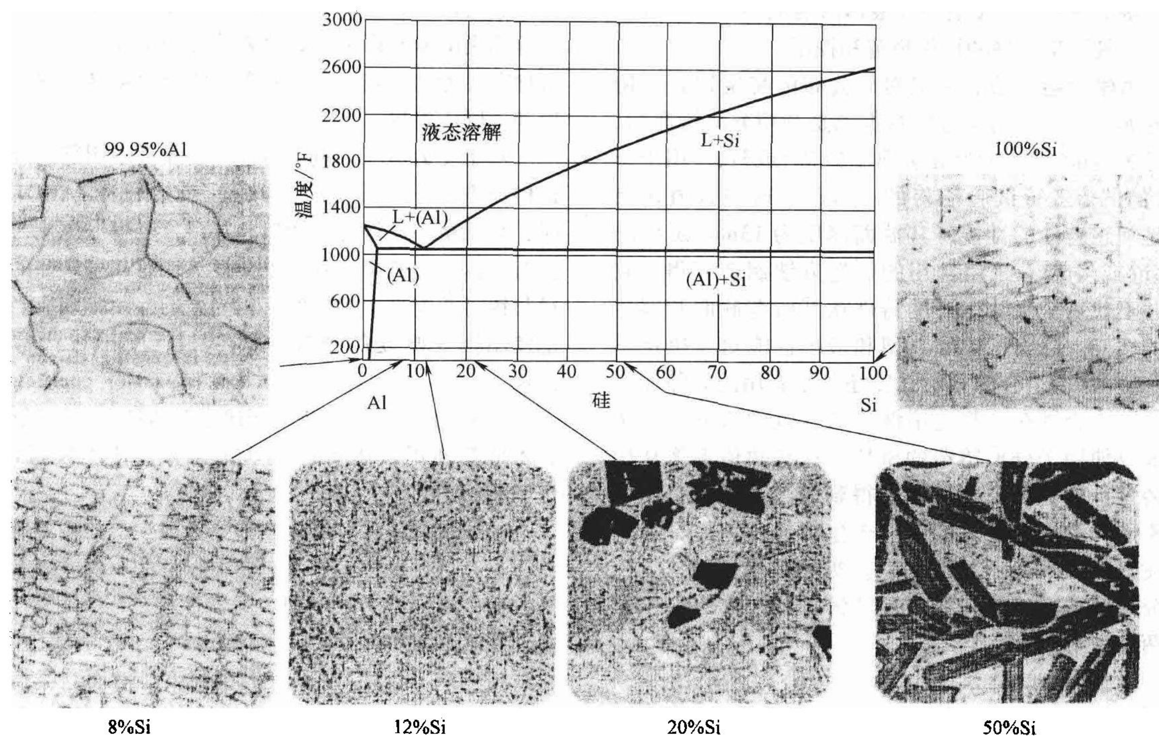


图3.1-33 铝-硅相图，纯组分和不同成分合金的铸造显微组织。低于12% Si的合金称为亚共晶，接近12% Si为共晶，而高于12% Si的合金称为过共晶

铜含量范围为0(合金356.0至361.0)至最高4.5%。其中大部分合金都有作为高强度成分的名义镁含量，其范围从0.3%~接近0.6%和作为活塞合金332.0和336.0的1.0%。该组中要求低含镁量[w(Mg)最高0.10%]的主要合金为压铸件的成分组从380.0到384.0。

铜和镁都能通过固溶硬化提高铸造(F)状态下的强度和硬度。仅通过人工时效(T5-型的状态)或完全固溶再加上人工时效处理(T6-或T7-型的状态)能获得大得多的强度和硬度提高。析出硬化是依据成分由Mg_2Si、Al_2Cu、Al_2CuMg或这些相的组合所构成的析出物组织而实现的。同时，含有铜和镁的合金具有高温下的较高强度。

高含硅量的合金适合用金属型和压铸型的工艺进行铸造。其线膨胀系数随硅和镍的含量增加而减小。线膨胀系数的减小有利于如活塞和缸体在发动机上的应用。当含硅量超过12%(如合金390.0到393.0)时，就会有初始硅晶体的存在，并且如能呈细微、均匀的分布，则能增强其耐磨性。

4*xx.x*组的合金由于作为二元的铝硅系统和含有5%~12%的Si(质量分数)，故可以在许多要求有中等强度并高塑性和高耐冲击的用途上得到应用。桥梁栏杆的支撑铸件就是有代表性的例子。

8*xx.x*组的合金含有近6%的Sn以及少量的铜和镍用于提高其强度。这些合金用于轴承用途(锡可产生润滑性)，例如柴油机中的连杆和曲轴箱轴承。

力学性能

本章第8节汇编了各种铸造铝合金的典型力学性能。这些典型数值只能用于评估一种合金在特定用途中的适用性，而不能作为设计的依据使用。就像在本节中“力学试验方法”将要讨论的，设计应力值显然要低于其典型性能数值。实际设计强度取决于多种因素，包括：

- 截面尺寸；
- 预期疏松程度；
- 锐角的存在；
- 在使用中存在循环载荷的几率。

最小力学性能极限值通常遵循一般公布的技术规范条款，如由政府机构和技术协会所制订的规定。这些文件往往规定了试验的频次、拉伸试棒的种类及设计、批次定义、试验步骤以及适用于试验结果的极限值。通过参考一般工艺的技术规范，这些文件也为许多新增的供应商的职责规定标准和范围，如对于熔液

的制备、热处理、X射线和液体渗透检测，以及试验步骤及其结果解释的操作规范和控制。

力学试验方法。一般对外公布的特定铝合金铸件的典型和最小力学性能数据都是利用分离铸造的、直径为½in(用于砂型和金属型铸造)或¼in(用于压铸)的试棒进行试验测得的。因此，这些数值代表的是理想铸件的性能，其截面厚度为13mm或6mm(½in或¼in)，采用常用的铸造方法制造获得，它们并不代表全尺寸生产的铸件在其所有截面和部位上的性能。然而试棒的典型和最小性能对于决定不同合金/状态组合的相对强度还是很有用的。除非另有注明，否则在一些应用性技术规范中所列的最小性能仅使用于分离铸造的试棒。这些数值不像从生产铸件上切割下来的试棒上得到的最小性能值，它们不能作为设计极限值应用于生产铸件。但是它们在质量保证方面还是有用的。实际力学性能，无论是分离铸造试棒的还是全尺寸铸件的，都取决于以下两个主要因素：

- 合金成分和热处理；
- 凝固模式和铸件致密性。

一些用于砂型、金属型、石膏型和熔模铸造的技术规范，都规定了从铸件上切割下的试件与分离铸造试件两种测试结果之间的相互关系。在常见的误差范围内，可以假设用这些不同试验方法得到的试验结果都应该是相吻合的。进而，可以期待分离铸造试件的性能要高于从铸件上切割下试件的性能。在缺少较为专用的数据参考时有一条经验法则规定切割试件的抗拉强度和屈服强度的平均值不低于分离铸造试件的最小要求值的75%，而伸长率则不低于其最小要求值的25%。这些关系在为有争议的零件设定商业性的验收标准时是有用的。

试件。为了精确测定合金铝铸件(或其他任何金属的铸件)的力学性能，必须选用合适的试件。就大部分的锻压产品而言，常可以认为其一小块材料能代表其余部分，从而从这一小块上测定的力学性能也就可以认为是具有代表性的。然而，从铸件上的一部分到另一部分，其力学性能都会有相当大的变化，而且同一炉次的不同铸件也会有变化。

如果铸件比较小，则可以从每一批中“牺牲”一件，将其切削加工成为试棒。如果铸件太大，则不能让其作为试件而遭受损失，可以将试棒作为整体铸型的一部分浇铸在每一铸件上，或者在分离的铸型中进行浇铸。

试棒通常都是在分离铸型中浇铸的。如果这么做，必须注意保证注入试棒铸型中的金属在以该试棒为代表的铸件金属中的代表性。此外，浇铸的温度和冷却速度的差异都会造成分离铸造的试棒性能与生产铸件在性能上的差别，因此必须防止产生这种温度和冷却速度的差异。

对于受力情况严重的铸件，首先考虑用整体浇铸试棒而不是分离浇铸试棒。然而当选用整体浇铸试棒时，必须精心设计它的浇口和冒口，以确保试棒与铸件有等同的显微组织及其整体性。还有如果试棒的直径与铸件关键部位的壁厚有相当大的差距，则应当考虑使用相等厚度的整体浇铸试板，用于替代标准试棒。

ASTM E 8规定了适用于评定铝铸件的标准试棒，并不推荐使用从压铸件上切割试棒，使用模拟(验证)试验则更值得考虑。

优质工程铸件。这是一种比常规生产的零件有更高质量和可靠性的铸件。它们在以下的一种或多种特征方面有最佳的功能表现：力学性能(用有代表性的零件切削加工而成的试件测试得到)、致密性(用X射线检测)、尺寸精度和表面粗糙度。然而这类铸件主要是以其达到的力学性能而著称的，反映了极佳的致密性、细微的枝晶臂间距以及良好的再细化晶粒结构。这些技术目标要求所用的化学成分能足以体现其优异的工程性能。被作为优质工程制品的合金，似乎都是以个别协商的技术规范或像MIL-A-21180一类的一些军事技术规范而出现的，在美国这类技术规范专用于满足对优质工程铸件需求的场合。

按定义和技术规范，一般可认为是优质合金的有 201.0、C355.0、A206.0、A356.0、224.0、A357.0、249.0、358.0和354.0。所有采用优质铸造工艺的合金都是以最佳硬化元素的浓度和对杂质的严格控制为其特征的。虽然任何一种合金都能以铸造的生产方式获得符合相应商业标准所要求的一般优质技术指标的性能和致密性，但是这里讨论的仅仅是抗拉强度、屈服强度和特别是伸长率均处于优质范围内的那些合金。它们分为两类：高强度的铝-硅制品和2*xx*系列的合金，并通过严格限制杂质元素的浓度来形成优异的塑性、韧性和拉伸性能，但其铸造性也明显变差。

热等压。铸铝件的热等压能减少疏松度，并因此降低力学性能的离散度。这种方法还有可能使那些因内部疏松的缘故而报废的铸件得到补救，从而提高铸造的成品率。当需经X射线检测的铸件所采用的铸造工艺达不到所要求的致密性时，这个优点显得格外重要。热等压经发展对于大部分的优质铸件都是适用的，特别对于一些比较难以浇铸的铝-铜系列尤为适

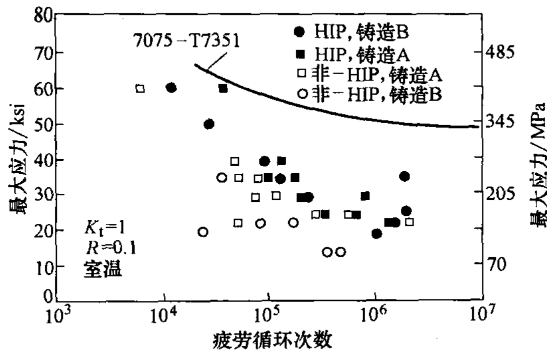


图 3.1-34　A201-T7 合金铸件用和不用热静等压(HIP)后的应力疲劳寿命数据

用。如图 3.1-34 所示，Al-Cu 铸造合金 A201-T7 采用热静等压后疲劳寿命得到改善。

精选参考文献

- *Aluminum Casting Technology,* American Foundrymen's Society, 1986.
- A. Kearney and E.L. Rooy, Aluminum Foundry Products, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 123–151.
- E.L. Rooy, Aluminum and Aluminum Alloys, *Casting,* Vol 15, *ASM Handbook,* ASM International, 1988, p 743–770.

第 8 节　铝铸件的性能

表 3.1-38　铝铸件合金的典型物理性质

铝业协会编号	状态①	相对密度②	密度②		近似熔点范围		电导率，%IACS	热导率在25℃(77℉)/(cm·g·s)	线膨胀系数/[×10⁻⁶/℃(×10⁻⁶/℉)]			
			kg/m³	lb/in³	℃	℉			20~100℃	68~212℉	20~300℃	68~570℉
201.0	T6(S)	2.80	2796	0.101	570~650	1060~1200	27~32	0.29	34.7	19.3	44.5	24.7
	T7(P)	2.80	2796	0.101	570~650	1060~1200	32~34	0.29	34.7	19.3	44.5	24.7
206.0	—	2.8	2796	0.101	570~650	1060~1200	—	0.29	—	—	—	—
A206.0	—	2.8	2796	0.101	570~650	1060~1200	—	0.29	—	—	—	—
208.0	F(S)	2.79	2796	0.101	520~630	970~1170	31	0.29	22.0	12.2	23.9	13.3
	O(S)	2.79	2796	0.101	520~630	970~1170	38	0.35	—	—	—	—
222.0	F(P)	2.95	2962	0.107	520~625	970~1160	34	0.32	221.⊖	12.3	23.6	13.1
	O(S)	2.95	2962	0.107	520~625	970~1160	41	0.38	—	—	—	—
	T61(S)	2.95	2962	0.107	520~625	970~1160	33	0.31	22.1	12.3	23.6	13.1
224.0	T62(S)	2.81	2824	0.102	550~645	1020~1190	30	0.28	—	—	—	—
238.0	F(P)	2.95	1938	0.107	510~600	950~1110	25	0.25	21.4	11.9	22.9	12.7
240.0	F(S)	2.78	2768	0.100	515~605	960~1120	23	0.23	22.1	12.3	24.3	13.5
242.0	O(S)	2.81	2823	0.102	530~635	990~1180	44	0.40	—	—	—	—
	T77(S)	2.81	2823	0.102	525~635	980~1180	38	0.36	22.1	12.3	23.6	13.1
	T571(P)	2.81	2823	0.102	525~635	980~1180	34	0.32	22.5	12.5	24.5	13.6
	T61(P)	2.81	2823	0.102	525~635	980~1180	33	0.32	22.5	12.5	24.5	13.6
295.0	T4(S)	2.81	2823	0.102	520~645	970~1190	35	0.33	22.9	12.7	24.8	13.8
	T62(S)	2.81	2823	0.102	520~645	970~1190	35	0.34	22.9	12.7	24.8	13.8
296.0	T4(P)	2.80	2796	0.101	520~630	970~1170	33	0.32	22.0	12.2	23.9	13.3
	T6(P)	2.80	2796	0.101	520~630	970~1170	33	0.32	22.0	12.2	23.9	13.3

⊖ 原书错误，应为 22.1。——译者注。

（续）

铝业协会编号	状态①	相对密度②	密度②		近似熔点范围		电导率，%IACS	热导率在25℃(77 ℉)/(cm·g·s)	线膨胀系数/[×10⁻⁶/℃(×10⁻⁶/℉)]			
			kg/m³	lb/in³	℃	℉			20～100℃	68～212 ℉	20～300℃	68～570 ℉
296.0	T62(S)	2.80	2796	0.101	520～630	970～1170	33	0.32	—	—	—	—
308.0	F(P)	2.79	2796	0.101	520～615	970～1140	37	0.34	21.4	11.9	22.9	12.7
319.0	F(S)	2.79	2796	0.101	520～605	970～1120	27	0.27	21.6	12.0	24.1	13.4
	F(P)	2.79	2796	0.101	520～605	970～1120	28	0.28	21.6	12.0	24.1	13.4
324.0	F(P)	2.67	2658	0.096	545～605	1010～1120	34	0.37	21.4	11.9	23.2	12.9
332.0	T5(P)	2.76	2768	0.100	520～580	970～1080	26	0.25	20.7	11.5	22.3	12.4
333.0	F(P)	2.77	2768	0.100	520～585	970～1090	26	0.25	20.7	11.5	22.7	12.6
	T5(P)	2.77	2768	0.100	520～585	970～1090	29	0.29	20.7	11.5	22.7	12.6
	T6(P)	2.77	2768	0.100	520～585	970～1090	29	0.28	20.7	11.5	22.7	12.6
	T7(P)	2.77	2768	0.100	520～585	970～1090	35	0.34	20.7	11.5	22.7	12.6
336.0	T551(P)	2.72	2713	0.098	540～570	1000～1060	29	0.28	18.9	10.5	20.9	11.6
354.0	F(P)	2.71	2713	0.098	540～600	1000～1110	32	0.30	20.9	11.6	22.9	12.7
355.0	T51(S)	2.71	2713	0.098	550～620	1020～1150	43	0.40	22.3	12.4	24.7	13.7
	T6(S)	2.71	2713	0.098	550～620	1020～1150	36	0.34	22.3	12.4	24.7	13.7
	T61(S)	2.71	2713	0.098	550～620	1020～1150	37	0.35	22.3	12.4	24.7	13.7
	T7(S)	2.71	2713	0.098	550～620	1020～1150	42	0.39	22.3	12.4	24.7	13.7
	T6(P)	2.71	2713	0.098	550～620	1020～1150	39	0.36	22.3	12.4	24.7	13.7
C355.0	T61(S)	2.71	2713	0.098	550～620	1020～1150	39	0.35	22.3	12.4	24.7	13.7
356.0	T51(S)	2.68	2685	0.097	560～615	1040～1140	43	0.40	21.4	11.9	23.4	13.0
	T6(S)	2.68	2685	0.097	560～615	1040～1140	39	0.36	21.4	11.9	23.4	13.0
	T7(S)	2.68	2685	0.097	560～615	1040～1140	40	0.37	21.4	11.9	23.4	13.0
	T6(P)	2.68	2685	0.097	560～615	1040～1140	41	0.37	21.4	11.9	23.4	13.0
A356.0	T6(S)	2.69	2713	0.098	560～610	1040～1130	40	0.36	21.4	11.9	23.4	13.0
357.0	T6(S)	2.68	2713	0.098	560～615	1040～1140	39	0.36	21.4	11.9	23.4	13.0
A357.0	T6(S)	2.69	2713	0.098	555～610	1030～1130	40	0.38	21.4	11.9	23.6	13.1
358.0	T6(S)	2.68	2658	0.096	560～600	1040～1110	39	0.36	21.4	11.9	23.4	13.0
359.0	T6(S)	2.67	2685	0.097	565～600	1050～1110	35	0.33	20.9	11.6	22.9	12.7
360.0	F(D)	2.68	2685	0.097	570～590	1060～1090	37	0.35	20.9	11.6	22.9	12.7
A360.0	F(D)	2.68	2685	0.097	570～590	1060～1090	37	0.35	21.1	11.7	22.9	12.7
364.0	F(D)	2.63	2630	0.095	560～600	1040～1110	30	0.29	20.9	11.6	22.9	12.7
380.0	F(D)	2.76	2740	0.099	520～590	970～1090	27	0.26	21.2	11.8	22.5	12.5
A380.0	F(D)	2.76	2740	0.099	520～590	970～1090	27	0.26	21.1	11.7	22.7	12.6
384.0	F(D)	2.70	2713	0.098	480～580	900～1080	23	0.23	20.3	11.3	22.1	12.3
390.0	F(D)	2.73	2740	0.099	510～650	950～1200	25	0.32	18.5	10.3	—	—

（续）

铝业协会编号	状态①	相对密度②	密度②		近似熔点范围		电导率,%IACS	热导率在25℃(77℉)/(cm·g·s)	线膨胀系数/[×10⁻⁶/℃(×10⁻⁶/℉)]			
			kg/m³	lb/in³	℃	℉			20~100℃	68~212℉	20~300℃	68~570℉
390.0	T5(D)	2.73	2740	0.099	510~650	950~1200	24	0.32	18.0	10.0	—	—
392.0	F(P)	2.64	2630	0.095	550~670	1020~1240	22	0.22	18.5	10.3	20.2	11.2
413.0	F(D)	2.66	2657	0.096	575~585	1070~1090	39	0.37	20.5	11.4	22.5	12.5
A413.0	F(D)	2.66	2657	0.096	575~585	1070~1090	39	0.37	—	—	—	—
443.0	F(S)	2.69	2685	0.097	575~630	1070~1170	37	0.35	22.1	12.3	24.1	13.4
	O(S)	2.69	2685	0.097	575~630	1070~1170	42	0.39	—	—	—	—
	F(D)	2.69	2685	0.097	575~630	1070~1170	37	0.34	—	—	—	—
A444.0	F(P)	2.68	2685	0.097	575~630	1070~1170	41	0.38	21.8	12.1	23.8	13.2
511.0	F(S)	2.66	2657	0.096	590~640	1090~1180	36	0.34	23.6	13.1	25.7	14.3
512.0	F(S)	2.65	2657	0.096	590~630	1090~1170	38	0.35	22.9	12.7	24.8	13.8
513.0	F(P)	2.68	2685	0.097	580~640	1080~1180	34	0.32	23.9	13.3	25.9	14.4
514.0	F(S)	2.65	2657	0.096	600~640	1110~1180	35	0.33	23.9	13.3	25.9	14.4
518.0	F(D)	2.53	2519	0.091	540~620	1000~1150	24	0.24	24.1	13.4	26.1	14.5
520.0	T4(S)	2.57	2574	0.093	450~600	840~1110	21	0.21	25.2	14.0	27.0	15.0
535.0	F(S)	2.62	2519	0.091	550~630	1020~1170	23	0.24	23.6	13.1	26.5	14.7
A535.0	F(D)	2.54	2547	0.092	550~620	1020~1150	23	0.24	24.1	13.4	26.1	14.5
B535.0	F(S)	2.62	2630	0.095	550~630	1020~1170	24	0.23	24.5	13.6	26.5	14.7
705.0	F(S)	2.76	2768	0.100	600~640	1110~1180	25	0.25	23.6	13.1	25.7	14.3
707.0	F(S)	2.77	2768	0.100	585~630	1090~1170	25	0.25	23.8	13.2	25.9	14.4
710.0	F(S)	2.81	2823	0.102	600~650	1110~1200	35	0.33	24.1	13.4	26.3	14.6
711.0	F(P)	2.84	2851	0.103	600~645	1110~1190	40	0.38	23.6	13.1	25.6	14.2
712.0	F(S)	2.82	2823	0.102	600~640	1110~1180	40	0.38	23.6	13.1	25.6	14.2
713.0	F(S)	2.84	2879	0.104	595~630	1100~1170	37	0.37	23.9	13.3	25.9	14.4
850.0	T5(S)	2.87	2851	0.103	225~650	440~1200	47	0.44	—	—	—	—
851.0	T5(S)	2.83	2823	0.102	230~630	450~1170	43	0.40	22.7	12.6	—	—
852.0	T5(S)	2.88	2879	0.104	210~635	410~1180	45	0.42	23.2	12.9	—	—

①S=砂型铸造；P=金属型铸造；D=压力铸造。 ②本表中的相对密度和密度数据均假定为实体金属（无孔隙）。因为有些疏松度在工业铸件中无法避免，故其相对密度和密度稍低于理论值。

表3.1-39 铸造铝合金的铸造性、耐腐蚀性、切削加工性和焊接性的评价

合金	耐热裂①	压力致密性	流动性②	收缩性③	耐腐蚀性④	切削性⑤	焊接性⑥
砂型铸造合金							
201.0	4	3	3	4	4	1	2
208.0	2	2	2	2	4	3	3

（续）

合金	耐热裂①	压力致密性	流动性②	收缩性③	耐腐蚀性④	切削性⑤	焊接性⑥
砂型铸造合金							
213.0	3	3	2	3	4	2	2
222.0	4	4	3	4	4	1	3
240.0	4	4	3	4	4	3	4
242.0	4	3	4	4	4	2	3
A242.0	4	4	3	4	4	2	3
295.0	4	4	4	3	3	2	2
319.0	2	2	2	2	3	3	2
354.0	1	1	1	1	3	3	2
355.0	1	1	1	1	3	3	2
A356.0	1	1	1	1	2	3	2
357.0	1	1	1	1	2	3	2
359.0	1	1	1	1	2	3	1
A390.0	3	3	3	3	2	4	2
A443.0	1	1	1	1	2	4	4
444.0	1	1	1	1	2	4	1
511.0	4	5	4	5	1	1	4
512.0	3	4	4	4	1	2	4
514.0	4	5	4	5	1	1	4
520.0	2	5	4	5	1	1	5
535.0	4	5	4	5	1	1	3
A535.0	4	5	4	4	1	1	4
B535.0	4	5	4	4	1	1	4
705.0	5	4	4	4	2	1	4
707.0	5	4	4	4	2	1	4
710.0	5	3	4	4	2	1	4
711.0	5	4	5	4	3	1	3
712.0	4	4	3	3	3	1	4
713.0	4	4	3	4	2	1	3
771.0	4	4	3	3	2	1	—
772.0	4	4	3	3	2	1	—
850.0	4	4	4	4	3	1	4
851.0	4	4	4	4	3	1	4
852.0	4	4	4	4	3	1	4
金属型铸造合金							
201.0	4	3	3	4	4	1	2

合金	耐热裂①	压力致密性	流动性②	收缩性③	耐腐蚀性④	切削性⑤	焊接性⑥
金属型铸造合金							
213.0	3	3	2	3	4	2	2
222.0	4	4	3	4	4	1	3
238.0	2	3	2	2	4	2	3
240.0	4	4	3	4	4	3	4
296.0	4	3	4	3	4	3	4
308.0	2	2	2	2	4	3	3
319.0	2	2	2	2	3	3	2
332.0	1	2	1	2	3	4	2
333.0	1	1	2	2	3	3	3
336.0	1	2	2	3	3	4	2
354.0	1	1	1	1	3	3	2
355.0	1	1	1	2	3	3	2
C355.0	1	1	1	2	3	3	2
356.0	1	1	1	1	2	3	2
A356.0	1	1	1	1	2	3	2
357.0	1	1	1	1	2	3	2
A357.0	1	1	1	1	2	3	2
359.0	1	1	1	1	2	3	1
A390.0	2	2	2	3	2	4	2
443.0	1	1	2	1	2	5	1
A444.0	1	1	1	1	2	3	1
512.0	3	4	4	4	1	2	4
513.0	4	5	4	4	1	1	5
711.0	5	4	5	4	3	1	3
771.0	4	4	3	3	2	1	—
772.0	4	4	3	3	2	1	—
850.0	4	4	4	4	3	1	4
851.0	4	4	4	4	3	1	4
852.0	4	4	4	4	3	1	4
压力铸造合金							
360.0	1	1	2	2	3	4	—
A360.0	1	1	2	2	3	4	—
364.0	2	2	1	3	4	3	—
380.0	2	1	2	5	3	4	—
A380.0	2	2	2	4	3	4	—

（续）

合金	耐热裂①	压力致密性	流动性②	收缩性③	耐腐蚀性④	切削性⑤	焊接性⑥	合金	耐热裂①	压力致密性	流动性②	收缩性③	耐腐蚀性④	切削性⑤	焊接性⑥
压力铸造合金								**压力铸造合金**							
384.0	2	2	1	3	3	4	—	C443.0	2	3	3	2	5	4	—
390.0	2	2	2	2	4	2	—	515.0	4	5	5	1	2	4	—
413.0	1	2	1	2	4	4	—	518.0	5	5	5	1	1	4	—

注：1，最好；5，最差。对于其他铸造工艺，各种合金可有不同的评价。

①当冷却通过热脆温度范围时，合金承受由收缩引发的应力的能力。 ②液态金属在铸型里易于流动或充满薄截面的能力。 ③体积随合金凝固的减小和要求以冒口形式进行金属补缩量的大小。 ④根据标准盐雾试验的合金耐腐蚀能力。 ⑤按照切削的难易、切屑特征、表面粗糙度和刀具寿命的综合评价。 ⑥根据材料，用同样合金焊条进行熔焊的能力。

表 3.1-40 以分离铸造试件试验的砂型铸造合金铝的力学性能

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm (2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	压缩屈服强度①		抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
201.0	T43	414	60	255	37	17.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	448	65	379	55	8.0	130	386	56	290	42	—	—	—	—
	T7	467	68	414	60	5.5	—	—	—	—	—	97	14	—	—
A206.0	T4	354	51	250	36	7.0	—	264	38	278	40	—	—	—	—
208.0	F	145	21	97	14	2.5	55	103	15	117	17	76	11	—	—
213.0	F	165	24	103	15	1.5	70	110	16	138	20	62	9	—	—
222.0	O	186	27	138	20	1.0	80	138	20	145	21	65	9.5	—	—
	T61	283	41	276	40	<0.5	115	296	43	221	32	59	8.5	74	10.7
	T62	421	61	331	48	4.0	—	338	49	262	38	—	—	—	—
224.0	T72	380	55	276	40	10.0	123	283	41	245	36	62	9.0	72	10.5
240.0	F	235	34	200	29	1.0	90	207	30	—	—	—	—	—	—
242.0	F	214	31	217	31	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	O	186	27	124	18	1.0	70	124	18	145	21	55	8	71	10.3
	T571	221	32	207	30	0.5	85	234	34	179	26	76	11	71	10.3
	T77	207	30	159	23	2.0	75	165	24	165	24	72	10.5	71	10.3
A242.0	T75	214	31	—	—	2.0	—	483	70	—	—	—	—	—	—
295.0	T4⑤	221	32	110	16	8.5	60	117	17	179	26	48	7	69	10.0
	T6	250	36	165	24	5.0	75	172	25	217	31	52	7.5	69	10.0
	T62	283	41	221	32	2.0	90	234	34	228	33	55	8	69	10.0
319.0	F	186	27	124	18	2.0	70	131	19	152	22	69	10	74	10.7
	T5	207	30	179	26	1.5	80	186	27	164	24	76	11	75	10.7
	T6	250	36	164	24	2.0	80	172	25	200	29	76	11	74	10.7

（续）

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	压缩屈服强度①		抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
355.0	F	159	23	83	12	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T51	193	28	159	23	1.5	65	164	24	152	22	55	8	70	10.2
	T6	241	35	172	25	3.0	80	179	26	193	28	62	9	70	10.2
	T61	269	39	241	35	1.0	90	255	37	214	31	65	9.5	—	—
	T7	264	38	250	36	0.5	85	264	38	193	28	69	10	70	10.2
	T71	241	35	200	29	1.5	75	207	30	179	26	69	10	70	10.2
C355.0	T6	269	39	200	29	5.0	85	—	—	—	—	—	—	—	—
356.0	F	164	24	124	18	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T51	172	25	138	20	2.0	60	145	21	138	20	55	8	72	10.5
	T6	228	33	164	24	3.5	70	172	25	179	26	59	8.5	72	10.5
	T7	234	34	207	30	2.0	75	214	31	164	24	62	9	72	10.5
	T71	193	28	145	21	3.5	60	152	22	138	20	59	8.5	72	10.5
A356.0	F	159	23	83	12	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T51	179	26	124	18	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	278	40	207	30	6.0	75	—	—	—	—	—	—	—	—
	T71	207	30	138	20	3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
357.0	F	172	25	90	13	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T51	179	26	117	17	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	345	50	296	43	2.0	90	—	—	—	—	—	—	—	—
	T7	278	40	234	34	3.0	60	—	—	—	—	—	—	—	—
A357.0	T6	317	46	248	36	3.0	85	241	35	278	40	83	12	—	—
A390.0	F	179	26	179	26	<1.0	100	—	—	—	—	—	—	82	11.9
	T5	179	26	179	26	<1.0	100	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	278	40	278	40	<1.0	140	—	—	—	—	90	13	—	—
	T7	250	36	250	36	<1.0	115	—	—	—	—	—	—	—	—
443.0	F	131	19	55	8	8.0	40	62	9	97	14	55	8	71	10.2
A444.0	F	145	21	62	9	9.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T4	159	23	62	9	12.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
511.0	F	145	21	83	12	3.0	50	90	13	117	17	55	8	—	—
512.0	F	138	20	90	13	2.0	50	97	14	117	17	59	8.5	—	—
514.0	F	172	25	83	12	9.0	50	83	12	138	20	48	7	71	10.2
520.0	T4	331	48	179	26	16.0	75	186	27	234	34	55	8	65	9.5
A535.0	F	250	36	124	18	9.0	65	—	—	—	—	—	—	—	—
710.0	F	241	35⑥	172	25⑥	5.0⑥	75⑥	172	25	179	26	55	8	67	9.7
712.0⑦	F	241	35	172	25	5.0	75	172	25	179	26	62	9	—	—

（续）

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	压缩屈服强度①		抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6 psi
713.0⑦	F	241	35	172	25	5.0	74	—	—	—	—	—	—	67	9.7
850.0	T5	138	20	76	11	8.0	45	76	11	97	14	—	—	71	10.2
851.0	T5	138	20	76	11	5.0	45	76	11	97	14	—	—	71	10.2
852.0	T5	186	27	152	22	2.0	65	152	22	124	18	69	10	71	10.2

注：拉伸和硬度的测试值使用直径为13mm(½in)的标准试件，其表面不经切削加工，每次铸造均采用湿砂铸型。

①0.2%条件屈服强度。 ②质量500kg(1102lb)，10mm(0.4in)的钢球。 ③疲劳寿命依据5亿次全交变应力，并使用旋转梁式疲劳试验机及其试件。 ④平均拉伸模量和平均压缩模量，压缩模量比拉伸模量大近2%。 ⑤在室温中放置数周后，T4性能接近T6。 ⑥试验在铸造后大约30天完成。 ⑦试验在铸造后10天完成。

表3.1-41 以分离铸造试件试验的金属型合金铸铝的力学性能

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	压缩屈服强度①		抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6 psi
201.0	T43	414	60	255	37	17.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	448	65	379	55	8.0	130	386	56	290	42	—	—	—	—
	T7	469	68	414	60	5.0	—	—	—	—	—	97	14	—	—
A206.0	T4	431	62	264	38	17.0	—	285	41	292	42	—	—	—	—
	T7	436	63	347	50	11.7	—	372	54	257	37	—	—	—	—
213.0	F	207	30	165	24	1.5	85	172	25	165	24	66	9.5	—	—
222.0	T52	241	35	214	31	1.0	100	214	31	172	25	—	—	—	—
	T551	255	37	241	35	<0.5	115	276	40	207	30	59	8.5	74	10.7
	T65	331	48	248	36	<0.5	140	248	36	248	26	62	9	74	10.7
238.0	F	207	30	165	24	1.5	100	207	30	165	24	—	—	—	—
242.0	T571	276	40	234	34	1.0	105	234	34	207	30	72	10.5	71	10.3
	T61	324	47	290	42	0.5	110	303	44	241	35	66	9.5	71	10.3
249.0	T63	476	69	414	60	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T7	278	62	359	52	9.0	—	414	60	276	40	55	8.0	72	10.5
296.0	T4⑤	255	37	131	19	9.0	75	138	20	207	30	66	9.5	70	10.1
	T6	276	40	179	26	5.0	90	179	26	221	32	69	10	70	10.1
	T7	270	39	138	20	4.5	80	138	20	207	30	63	9	70	10.1
308.0	F	193	28	110	16	2.0	70	117	17	152	22	90	13	—	—
319.0	F	234	34	131	19	2.5	85	131	19	165	24	—	—	—	—
	T6	276	40	186	27	3.0	95	186	27	—	—	—	—	—	—
324.0	F	207	30	110	16	4.0	70	—	—	—	—	—	—	—	—
	T5	248	36	179	26	3.0	90	—	—	—	—	—	—	—	—
	T62	310	45	269	39	3.0	105	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	压缩屈服强度①		抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
332.0	T5	248	36	193	28	1.0	105	—	—	—	—	—	—	77	11.2
333.0	F	234	34	131	19	2.0	90	131	19	186	27	100	14.5	—	—
	T5	234	34	172	25	1.0	100	172	25	186	27	83	12	—	—
	T6	290	42	207	30	1.5	105	207	30	228	33	103	15	—	—
	T7	255	37	193	28	2.0	90	193	28	193	28	83	12	—	—
336.0	T551	248	36	193	28	0.5	105	193	28	193	28	93	13.5	—	—
	T65	324	47	296	43	0.5	125	296	43	248	36	—	—	—	—
355.0	T51	205	30	165	24	2.0	75	165	24	165	24	—	—	—	—
	T6	290	42	185	27	4.0	90	185	27	235	34	69	10	—	—
	T61	310	45	275	40	1.5	105	275	40	250	36	69	10	—	—
	T7	275	40	205	30	2.0	85	205	30	205	30	69	10	—	—
	T71	250	36	215	31	3.0	85	215	31	185	27	69	10	—	—
C355.0	T61	303	44	234	34	3.0	90	248	36	221	32	97	14	—	—
356.0	F	179	26	124	18	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T51	186	27	138	20	2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	262	38	186	27	5.0	80	186	27	207	30	90	13	72	10.5
	T7	221	32	165	24	6.0	70	165	24	172	25	76	11	72	10.5
A356.0	T61	283	41	207	30	10.0	90	221	32	193	28	90	13	72	10.5
357.0	F	193	28	103	15	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T51	200	29	145	21	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	359	52	296	43	5.0	100	303	44	241	35	90	13	—	—
A357.0	T6	359	52	290	42	5.0	100	296	43	241	35	103	15	—	—
359.0	T62	345	50	290	42	5.5	—	—	—	—	—	110	16	—	—
A390.0	F	200	29	200	29	<1.0	110	—	—	—	—	—	—	82	11.9
	T5	200	29	200	29	<1.0	110	—	—	—	—	—	—	—	—
	T6	310	45	310	45	<1.0	145	414	60	—	—	117	17	—	—
	T7	262	38	262	38	<1.0	120	359	52	—	—	100	14.5	—	—
443.0	F	159	23	62	9	10.0	45	62	9	110	16	55	8	71	10.3
A444.0	F	165	24	76	11	13.0	44	—	—	—	—	—	—	—	—
	T4	159	23	69	10	21.0	45	76	11	110	16	55	8	—	—
513.0	F	186	27	110	16	7.0	60	117	17	152	22	69	10	—	—

（续）

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	压缩屈服强度①		抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
711.0	F	241	35⑥	124	18⑥	8.0⑥	70⑥	—	—	—	—	76	11	76	11.0
850.0	T5	159	23	76	11	12.0	45	76	11	103	15	62	9	71	10.3
851.0	T5	138	20	76	11	5.0	45	76	11	97	14	62	9	71	10.3
852.0	T5	221	32	159	23	5.0	70	159	23	148	21	76	11	71	10.3

注：拉伸和硬度值的测试使用直径为13mm(½in)的标准试件，其表面不经切削加工，每次铸造均采用金属铸型。

①0.2%条件屈服强度。 ②质量500kg(1102lb)，直径10mm(0.4in)的钢球。 ③疲劳寿命依据5亿次全交变应力，并使用旋转梁式疲劳试验机及其试件。 ④平均拉伸模量和平均压缩模量，压缩模量比拉伸模量大近2%。 ⑤在室温中放置数周后，T4性能接近T6。 ⑥试验在铸造后大约30天完成。

表3.1-42 以分离铸造试件的试验压铸型合金铸铝的力学性能

铝业协会编号	状态	抗拉强度		拉伸屈服强度①		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度② HB	抗剪强度		疲劳极限③		弹性模量④	
		MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi
360.0	F	324	47	172	25	3.0	75	207	30	131	19	71	10.3
A360.0	F	317	46	165	24	5.0	75	200	29	124	18	—	—
364.0	F	296	43	159	23	7.5	—	179	26	124	18	—	—
380.0	F	331	48	165	24	3.0	80	214	31	145	21	71	10.3
A380.0	F	324	47	159	23	4.0	80	207	30	138	20	—	—
384.0	F	324	47	172	25	1.0	—	207	30	145	21	71	10.3
390.0	F	279	40.5	241	35	1.0	120	—	—	138	20	82	11.9
	T5	296	43	265	38.5	1.0	—	—	—	—	—	—	—
392.0	F	290	42	262	38	<0.5	—	234⑤	34⑤	103⑤	15⑤	—	—
413.0	F	296	43	145	21	2.5	80	193	28	131	19	71	10.3
A413.0	F	241	35	110	16	3.5	80	172	25	131	19	—	—
443.0	F	228	33	110	16	9.0	50	145	21	117	17	71	10.3
513.0	F	276	40	152	22	10.0	—	179	26	124	18	—	—
515.0	F	283	41	—	—	10.0	—	—	—	—	—	—	—
518.0	F	310	45	186	27	8.0	80	200	29	138	20	—	—

注：拉伸和硬度的平均测试值使用直径为6mm(¼in)的ASTM标准试件，在冷腔(高压)模的压铸机上铸造。

①0.2%条件屈服强度。 ②质量500kg(1102lb)，直径10mm(0.4in)的钢球。 ③疲劳寿命依据5亿次全交变应力，并使用旋转梁式疲劳试验机及其试件。 ④平均拉伸模量和平均压缩模量，压缩模量比拉伸模量大近2%。 ⑤估计值。

表 3.1-43 砂型铸造铝合金的力学性能极限值

铝业协会编号	状态	性能最小值①				
		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
201.0	T6	414	60.0	345	50.0	5.0
	T7	414	60.0	345	50.0	3.0
204.0	T4	310	45.0	193	28.0	6.0
208.0	F	131	19.0	83	12.0	1.5
	T55	145	21.0	—	—	—
222.0	O	159	23.0	—	—	—
	T61	207	30.0	—	—	—
242.0	O	159	23.0	—	—	—
	T571	200	29.0	—	—	—
	T61	221	32.0	138	20.0	—
	T77	165	24.0	90	13.0	1.0
295.0	T4	200	29.0	90	13.0	6.0
	T6	221	32.0	138	20.0	3.0
	T62	248	36.0	193	28.0	—
	T7	200	29.0	110	16.0	3.0
319.0	F	159	23.0	90	13.0	1.5
	T5	172	25.0	—	—	—
	T6	214	31.0	138	20.0	1.5
328.0	F	172	25.0	97	14.0	1.0
	T6	234	34.0	145	21.0	1.0
354.0	②	—	—	—	—	—
355.0	T51	172	25.0	124	18.0	—
	T6	221	32.0	138	20.0	2.0
	T7	241	35.0	—	—	—
	T71	207	30.0	152	22.0	—
C355.0	T6	248	36.0	172	25.0	2.5
356.0	F	131	19.0	—	—	2.0

铝业协会编号	状态	性能最小值①				
		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
356.0	T51	159	23.0	110	16.0	—
	T6	207	30.0	138	20.0	3.0
	T7	214	31.0	200	29.0	—
	T71	172	25.0	124	18.0	3.0
A356.0	T6	234	34.0	165	24.0	3.5
A357.0	②	—	—	—	—	—
359.0	②	—	—	—	—	—
443.0	F	117	17.0	48	7.0	3.0
B443.0	F	117	17.0	41	6.0	3.0
514.0	F	152	22.0	62	9.0	6.0
520.0	T4	290	42.0	152	22.0	12.0
535.0	F 或 T5	241	35.0	124	18.0	9.0
705.0	F 或 T5	207	30.0	117	17.0	5.0
707.0	F 或 T5	227	33.0	152	22.0	2.0
	T7	255	37.0	207	30.0	1.0
710.0	F 或 T5	221	32.0	138	20.0	2.0
712.0	F 或 T5	234	34.0	172	25.0	4.0
713.0	F 或 T5	221	32.0	152	22.0	3.0
771.0	T5	290	42.0	262	38.0	1.5
	T51	221	32.0	186	27.0	3.0
	T52	248	36.0	207	30.0	1.5
	T53	248	36.0	186	27.0	1.5
	T6	290	42.0	241	35.0	5.0
	T71	331	48.0	310	45.0	2.0
850.0	T5	110	16.0	—	—	5.0
851.0	T5	117	17.0	—	—	3.0
852.0	T5	165	24.0	124	18.0	—

①这些数值代表分离铸造试棒的性能，并符合 ASTM B 26《砂型铝合金的标准技术规范》、美国的联邦技术规范 QQ-A-601e《砂型铝合金铸件》和美国的国防部技术规范 MIL-A-21180C《高强度铝合金铸件》。除非另有规定，从铸件上切割下的试件的抗拉强度、屈服强度的平均值不应小于表中所列的抗拉强度、屈服强度的75%，而平均伸长率则不应小于表中所列的25%。用户还应记住：一些铸造工厂还可以提供一些其他状态，而且铸造商都一直在不断地改进其技术，因此提供的最低性能也会超过表中所列的。 ②该合金的力学性能取决于铸造工艺，进一步的有关资料可向铸造商查询。

表 3.1-44　金属型铸造铝合金的力学性能极限值

铝业协会编号	状态	性能最小值[1]				
		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
204.0	T4	331	48.0	200	29.0	8.0
208.0	T4	227	33.0	103	15.0	4.5
	T6	241	35.0	152	22.0	2.0
	T7	227	33.0	110	16.0	3.0
213.0	F	159	23.0	—	—	—
222.0	T551	207	30.0	—	—	—
	T65	276	40.0	—	—	—
242.0	T571	234	34.0	—	—	—
	T61	276	40.0	—	—	—
296.0	T4	227	33.0	—	—	4.5
	T6	241	35.0	—	—	2.0
	T7	227	33.0	—	—	3.0
308.0	F	165	24.0	—	—	—
319.0	F	193	28.0	97	14.0	1.5
	T6	234	34.0	—	—	2.0
332.0	T5	214	31.0	—	—	—
333.0	F	193	28.0	—	—	—
	T5	207	30.0	—	—	—
	T6	241	35.0	—	—	—
	T7	214	31.0	—	—	—
336.0	T551	214	31.0	—	—	—
	T65	276	40.0	—	—	—
354.0	②	—	—	—	—	—
355.0	T51	186	27.0	—	—	—
	T6	255	37.0	—	—	1.5
	T62	290	42.0	—	—	—
355.0	T7	248	36.0	—	—	—
	T71	234	34.0	186	27.0	—
C355.0	T61	276	40.0	207	30.0	3.0
356.0	F	145	21.0	—	—	3.0
	T51	172	25.0	—	—	—
	T6	227	33.0	152	22.0	3.0
	T7	172	25.0	—	—	3.0
	T71	172	25.0	—	—	3.0
A356.0	T61	255	37.0	179	26.0	5.0
357.0	T6	310	45.0	—	—	3.0
A357.0	②	—	—	—	—	—
359.0	②	—	—	—	—	—
443.0	F	145	21.0	48	7.0	2.0
B443.0	F	145	21.0	41	6.0	2.5
A444.0	T4	138	20.0	—	—	20.0
513.0	F	152	22.0	83	12.0	2.5
535.0	F	241	35.0	124	18.0	8.0
705.0	T5	255	37.0	117	17.0	10.0
707.0	T5	290	42.0	172	25.0	4.0
	T7	310	45.0	241	35.0	3.0
711.0	T1	193	28.0	124	18.0	7.0
713.0	T5	221	32.0	152	22.0	4.0
850.0	T5	124	18.0	—	—	8.0
851.0	T5	117	17.0	—	—	3.0
	T6	124	18.0	—	—	8.0
852.0	T5	186	27.0	—	—	3.0

①这些数值代表分离铸造试棒的性能，并符合 ASTM B 108《金属型铝合金的标准技术规范》、美国的联邦技术规范 QQ-A-596d《砂型铝合金铸件》和美国的国防部技术规范 MIL-A-21180c《高强度铝合金铸件》。除非另有规定，从铸件上切割下的试件的抗拉强度、屈服强度平均值不应小于表中所列的抗拉强度、屈服强度的75%而平均伸长率则不应小于表中所列的25%。用户还应记住：一些铸造工厂还可以提供上述合金的一些其他状态，而且铸造商都一直在不断地改进其技术，因此提供的最低性能也会超过表中所列的。　②该合金的力学性能取决于铸造工艺，进一步的有关资料可向铸造商查询。

表 3.1-45 从金属模铸件上切割下的试件的力学性能极限值(按 ASTM B 108)

合金和状态	性能最小值					合金和状态	性能最小值				
	抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)		抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	
从铸件指定部位切割下的试件						**从铸件任意部位切割下的试件**					
354.0-T61	324	47	248	36	3.0	354.0-T61，T62	297	43	228	33	2.0
354.0-T62	344	50	290	42	2.0	C355.0-T61	255	37	207	30	3.0
C355.0-T61	276	40	207	30	3.0	A356.0-T61	193	28	179	26	3.0
A356.0-T61	228	33	179	26	5.0	A357.0-T61	283	41	214	31	3.0
A357.0-T61	317	46	248	36	3.0	359.0-T61，T62	276	40	207	30	3.0
359.0-T61	310	45	234	34	4.0	A444.0-T4	138	20	—	—	20.0
359.0-T62	324	47	262	38	3.0						
A444.0-T4	138	20	—	—	20.0						

表 3.1-46 优质铝合金铸件和高温铸铝合金的典型力学性能

合金及其状态	硬度[①] HB	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	压缩屈服强度		抗剪强度		疲劳强度[②]	
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
优质铸件[③]												
A201.0-T7	—	495	72	448	65	6	—	—	—	—	97	14
A206.0-T7	—	445	65	405	59	6	—	—	—	—	90	13
224.0-T7	—	420	61	330	48	4	—	—	—	—	86	12.5
249.0-T7	—	470	68	407	59	6	—	—	—	—	75	11
354.0-T6	—	380	55	283	41	6	—	—	—	—	135[④]	19.5[④]
C355.0-T6	—	317	46	235	34	6	—	—	—	—	97	14
A356.0-T6	—	283	41	207	30	10	—	—	—	—	90	13
A357.0-T6	—	360	52	290	42	8	—	—	—	—	90	13
活塞和高温砂型铸造合金												
222.0-T2	80	185	27	138	20	1	—	—	—	—	—	—
222.0-T6	115	283	41	275	40	<0.5	—	—	—	—	—	—
242.0-T21	70	185	27	125	18	1	—	—	145	21	55	8
242.0-T571	85	220	32	207	30	0.5	—	—	180	26	75	11
242.0-T77	75	207	30	160	23	2	165	24	165	24	72	10.5
A242.0-T75	—	215	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—
243.0	95	207	30	160	23	2	200	29	70	10	70	10
328.0-F	—	220	32	130	19	2.5	—	—	—	—	—	—
328.0-T6	85	290	42	185	27	4.0	180	26	193	28	—	—
活塞和高温合金(金属模铸件)												
222.0-T55	115	255	37	240	35	—	295	43	207	30	59	8.5
222.0-T65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
242.0-T571	105	275	40	235	34	1	—	—	207	30	72	10.5

（续）

合金及其状态	硬度①HB	抗拉强度		拉伸屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	压缩屈服强度		抗剪强度		疲劳强度②	
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
活塞和高温合金（金属模铸件）												
242.0-T61	110	325	47	290	42	0.5	—	—	240	35	65	9.5
332.0-T551	105	248	36	193	28	0.5	193	28	193	28	90	13
332.0-T5	105	248	36	193	28	1	200	29	193	28	90	13
336.0-T65	125	325	47	295	43	0.5	193	28	248	36	—	—
336.0-T551	105	248	36	193	28	0.5	193	28	193	28	—	—

①直径10mm(0.4in)的钢球，具有500kgf(1100lbf)的重力。 ②旋转梁式疲劳试验，5×10^8 周。 ③不论试件的种类或其切割部位，优质铸件的典型值都一样。最小值见表3.1-47。 ④$10^6$ 周的疲劳强度。

表3.1-47 优质铝合金铸件的最小拉伸性能

合金	等级	最小抗拉强度		0.2%条件屈服强度（最小）		50mm(2in)长的伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
从铸件指定部位切割下来的试件						
A201.0-T7①	等级1	414	60	345	50	5
	等级2	414	60	345	50	3
224.0-T7	等级1	345	50	255	37	3
	等级2	379	55	255	37	5
249.0-T7	等级1	345	50	276	40	2
	等级2	379	55	310	45	3
	等级3	414	60	345	50	5
354.0-T6①	等级1	324	47	248	36	3
	等级2	345	50	290	42	2
C355.0-T6①	等级1	283	41	214	31	3
	等级2	303	44	228	33	3
	等级3	345	50	276	40	2
A356.0-T6①	等级1	262	38	193	28	5
	等级2	276	40	207	30	3
	等级3	310	45	234	34	3
A357.0-T6①	等级1	310	45	241	35	3
	等级2	345	50	276	40	3
224.0	等级1	345	50	255	37	3
	等级2	379	55	255	37	5

合金	等级	最小抗拉强度		0.2%条件屈服强度（最小）		50mm(2in)长的伸长率(%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
从铸件指定部位切割下来的试件						
A201.0-T7①	等级10	386	56	331	48	3
	等级11	379	55	331	48	1.5
224.0-T7	等级10	310	45	241	35	2
	等级11	345	50	255	37	3
249.0-T7	等级10	379	55	310	45	3
	等级11	345	50	276	40	2
354.0-T6①	等级10	324	47	248	36	3
	等级11	296	43	228	33	2
355.0-T6①	等级10	283	41	214	31	3
	等级11	255	37	207	30	1
	等级12	241	35	193	28	1
A356.0-T6①	等级10	262	38	193	28	5
	等级11	228	33	186	27	3
	等级12	221	32	152	22	2
A357.0-T6①	等级10	262	38	193	28	5
	等级11	283	41	214	31	3
224.0	等级10	310	45	241	35	2
	等级11	345	50	255	37	3

注：作为合适的铸件形状，这些力学性能值都是能达到的，若要求特殊形状则必须同铸造商协商。

①数值取自MIL-A-21180。

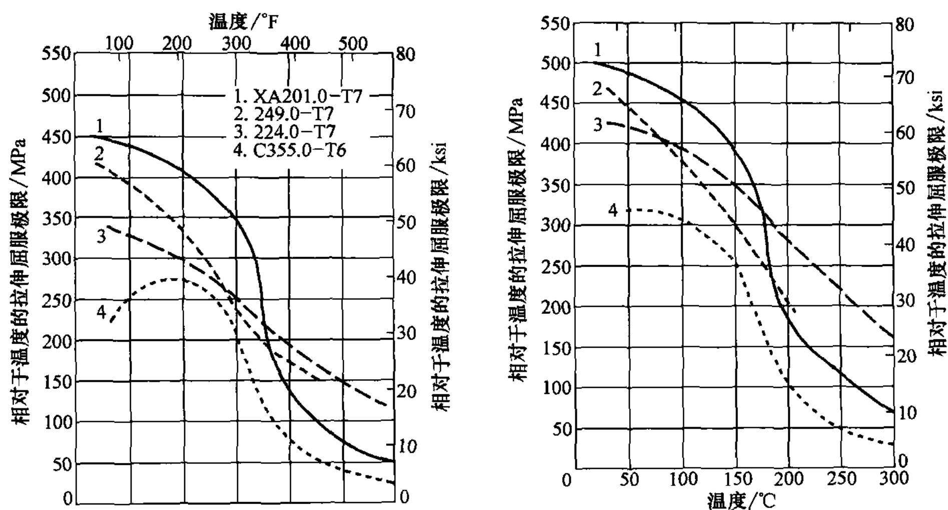


图 3.1-35　建议应用于高温用途的各种不同优质铸造合金的高温抗拉强度。温度的持续时间为 10000h

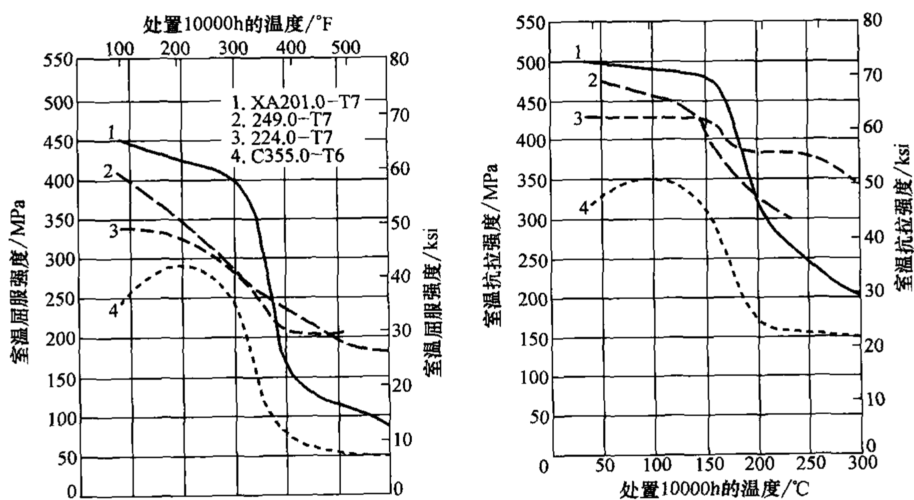


图 3.1-36　经过 10000h 的温度处置后的不同铝合金优质铸件的室温抗拉强度

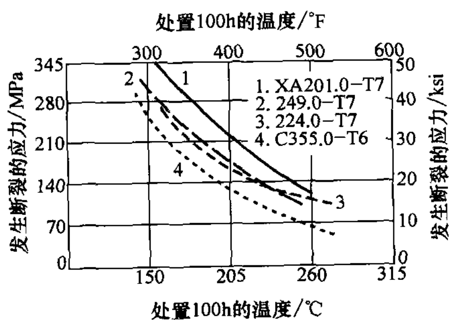


图 3.1-37　优质铝合金铸件的 100h 应力断裂

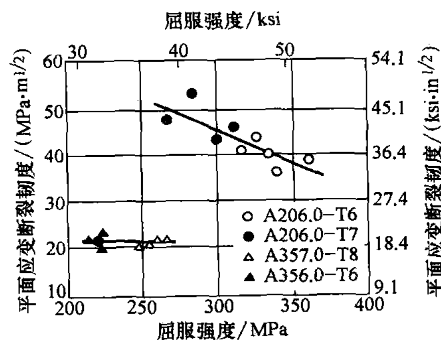


图 3.1-38　合金 A206.0、A357.0 和 A356.0 对应屈服强度的不同平面应变断裂韧度

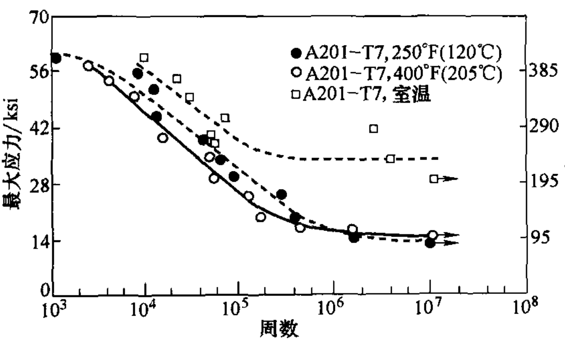


图3.1-39　合金A201-T7的三种试验温度的应力-疲劳寿命数据

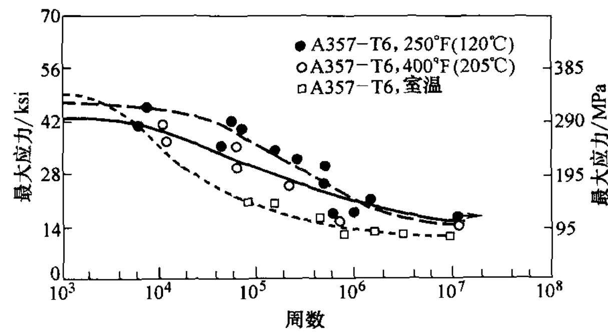


图3.1-40　合金A357-T6的三种试验温度的应力-疲劳寿命数据

表3.1-48　合金201.0的分离砂型铸造试棒的蠕变断裂性能

温度		应力作用下的时间[①]/h	断裂应力		最小蠕变率的断裂应力 %/h	下列蠕变率时的应力					
						1.0%		0.5%		0.25%	
℃	℉		MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
150	300	10	屈服以上		—	—	—	—	—	—	—
		100	屈服以上		—	—	—	—	—	—	—
		1000	270	39	0.00013	260	38	250	36	250	36
		10000	195	28	0.000023	195	28	185	27	180	76
205	400	10	250	36	0.0145	240	35	230	33	220	32
		100	180	26	0.0024	180	26	170	24	170	24
		1000	130	19	0.00046	130	19	125	18	110	16
		10000	95	14	0.000088	95	14	90	13	85	12
260	500	10	140	20	0.047	140	20	125	18	110	16
		100	95	14	0.0080	95	14	95	14	85	12
		1000	70	10	0.00130	70	10	70	9.8	60	8.6
		10000	50	7.5	0.00028	50	7.5	50	7.2	45	6.3

①10000h的数据是用外推法得到的。

表3.1-49　合金C355.0-T61的分离铸造试棒的蠕变断裂性能

温度		应力作用下的时间/h	断裂应力		下列蠕变率时的应力							
					1.0%		0.5%		0.25%		0.1%	
℃	℉		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
150	300	0.1	285	41	275	40	270	39	240	35	230	33
		1	285	41	270	39	260	38	235	34	220	32
		10	275	40	260	38	250	36	230	33	205	30
		100	260	38	250	36	235	34	215	31	170	25
		1000	220	32	215	31	206	30	185	27	140	20

（续）

温度		应力作用下的时间/h	断裂应力		下列蠕变率时的应力							
					1.0%		0.5%		0.25%		0.1%	
℃	℉		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
205	400	0.1	250	36	250	36	240	35	230	33	170	25
		1	230	33	220	32	205	30	170	25	140	20
		10	180	26	120	25	160	23	130	19	110	16
		100	130	19	130	19	125	18	97	14	—	—
		1000	97	14	90	13	83	12	—	—	—	—
260	500	0.1	165	24	145	21	130	19	105	15	83	12
		1	125	18	110	16	97	14	83	12	59	8.5
		10	90	13	83	12	76	11	59	8.5	41	6
		100	62	9	62	9	55	8	41	6	—	—
		1000	45	6.5	45	6.5	41	6	—	—	—	—

表 3.1-50 合金 A356.0-T61 在 150℃(300℉)的分离铸造试棒的蠕变断裂性能

应力作用下的时间/h	断裂应力		下列蠕变率时的应力							
			1.0%		0.5%		0.2%		0.1%	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
0.1	235	34	215	31	205	30	195	28	185	27
1	235	34	215	31	200	29	185	27	180	26
10	230	33	205	30	195	28	180	26	170	25
100	200	29	195	28	185	27	170	25	165	24
1000	165	24	165	24	160	23	—	—	—	—

表 3.1-51 合金 354.0-T61 的分离铸造试棒的疲劳强度

温度		疲劳极限											
		10^4 周		10^5 周		10^6 周		10^7 周		10^8 周		5×10^8 周	
℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
24	75	345	50	275	40	215	31	175	25.5	145	21	135	19.5
150	300	—	—	255	37	200	29	150	21.5	115	17	110	16
205	400	—	—	215	31	150	22	105	15	70	10	60	9
260	500	195	28	140	20.5	96	14	60	9	40	6	40	6
315	600	—	—	75	11	55	8	40	6	30	4	30	4

注：R. R. Moore 型试验。

表3.1-52　合金C355.0-T61的分离铸造试棒的疲劳性能

温度		周数	疲劳强度①		温度		周数	疲劳强度①	
℃	℉		MPa	ksi	℃	℉		MPa	ksi
24	75	10^5	195	28.0	260	500	10^5	125	18.0
		10^6	130	19.0			10^6	80	11.5
		10^7	110	16.0			10^7	50	7.5
		10^8	100	14.5			10^8	40	5.5
		5×10^8	95	14.0			5×10^8	35	5.0

①室温下的旋转梁式试验和高温下的悬臂梁(旋转载荷)试验。

第9节　铝的粉末冶金产品

铝的粉末冶金(P/M)产品在整个铝工业中仅占有非常小的一部分。事实上，所生产铝粉的主要部分并不用于结构零件，而是以非固结的形式用于油漆/颜料，以此应用于屋顶和汽车涂料，用于有粉末金属填充的塑料；还用于燃料推进剂、烟火(焰火)和工业炸药；以及在金属粉末切割工艺(铁-铝粉)和铝热焊接(铝热剂)中的应用。尽管如此，铝P/M合金在各种构件的应用上仍有一定的意义，因为P/M技术比铸锭冶金(I/M)能使铝合金形成更加细微且均匀的显微组织、较好的力学性能以及近净形零件的生产性。除了常用的将原生或预合金的粉末调和并固结成为近净形零件(经压制和烧结的P/M零件)，一些新出现工艺如机械合金化(MA)和快速凝固(RS)，用于生产的粉末能使其后的固结显著改善其室温和高温下的强度、断裂韧度、疲劳寿命以及耐腐蚀和应力腐蚀开裂(SCC)的性能。包括喷射沉积/成形工艺在内的先进P/M工艺方法的另一个优点就是所生产的一些新合金(及复合物)具有用I/M生产无法获得的金相组织和制品。快速凝固工艺能提高合金元素特别是过渡元素和稀土元素的溶解度，并细化金属间化合物相的结构，从而提高其力学性能。机械合金化是一种干的、高能量碾磨工艺，用于对非溶性氧化物和碳化物产生弥散作用，促使显微组织稳定化，最后形成固结材料的高温强度。

尽管铝合金的P/M处理有其优点，但是迄今尚未实现它们的大规模商品化。对其应用来说，难以承受的高成本依然是个主要顾虑，此外还存在其他技术在诸如再现性/可靠性、切削加工、连接和回收利用等方面的挑战，就此需进一步阐述。

压制和烧结的P/M零件

压制和烧结合金是用铝粉混以少量的铜、镁和硅(表3.1-53)所构成的。其压实块是用140～345MPa(10～25tsi)压制而成的，并在595～620℃(1100～1150℉)温度下和氮气中烧结，达到理论密度的90%～95%(在游离氨或真空中的烧结会导致性能的稍微降低)。烧结成的产品强度相对较低，它们需经热处理和/或变形处理(辊轧、挤压或锻造)用于改善其性能(表3.1-54)。烧结铝零件的用途包括商用机器(最大市场)、器具、汽车零件以及动力工具。

表3.1-53　用于压制和烧结零件的铝P/M的合金粉末成分

牌号	化学成分(质量分数,%)					牌号	化学成分(质量分数,%)				
	Cu	Mg	Si	Al	润滑剂		Cu	Mg	Si	Al	润滑剂
601AB	0.25	1.0	0.6	余量	1.5	MD-22	2.0	1.0	0.3	余量	1.5
201AB	4.4	0.5	0.8	余量	1.5	MD-24	4.4	0.5	0.9	余量	1.5
602AB	—	0.6	0.4	余量	1.5	MD-69	0.25	1.0	0.6	余量	1.5
202AB	4.0	—	—	余量	1.5	MD-76	1.6	2.5	—	余量	1.5

表3.1-54 氮烧结的铝合金的力学性能

合金	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi	
201AB-T6(95%密度)	336	48.7	322	46.7	2
201AB-T6(97%密度,轧制)	332	48.2	327	47.4	2
202AB-T6(92.4%密度)	227	32.9	147	21.3	7.3
202AB-T8(92.4%密度,冷成形,19%应变)	280	40.6	250	36.3	3
601AB-T6(96%密度)	238	34.5	230	33.4	2
601AB-T6(96%密度,轧制)	252	36.5	241	35.0	2
602AB-T6(96%密度)	186	27.0	172	24.9	3

高性能P/M合金

工艺方法

高性能P/M铝合金的工艺步骤能以不同的方式组合，但是都能对它们最为简便地阐述如下：

- 粉末生产。粉末可以用不同的RS法制造，包括雾化法、急剧淬冷形成微粒和熔体旋淬形成铝合金薄带。
- 粉末处理(可选的)，包括机械合金化或将熔体薄带粉碎成粉末，以供后续处理。机械合金化适用于制造氧化物弥散强化合金。利用高能球磨机将纯金属和合金成分以机械的方式熔合在一起。在这个过程中，粉末颗粒的强力加工经过反复熔焊、破碎和再熔焊成为紧密的合金化。在铝合金的情形里，来自工艺控制剂的碳掺和进入经工艺处理的粉末并且与铝发生反应生成一种非常细的碳化物。这种碳化物与初始粉末颗粒在其表面膜经粉碎后所形成的细微氧化物颗粒，产生一种能稳定细粒化显微组织的弥散作用。因此，超细的晶粒大小经过氧化物和碳化物的弥散作用的稳定化之后，便能从中获得部分或完全的强化。
- 脱气。将粉末密封在罐里进行脱气，以防止发生氢疏松。
- 固结。粉末用真空或热等静压压制成为锭材，继之以轧制、挤压或锻造。

高性能合金的等级

高室温强度，耐SCC/腐蚀的合金。快速凝固工艺适用于生产Al-Zn-Mg-Cu合金7091和7090，它们的成分与I/M合金7175相似，但分别含有0.4%和1.5%的Co(表3.1-55)。钴能形成呈均匀弥散的Co_2Al_9或$(Co、Fe)_2Al_9$颗粒。这些弥散相使晶粒细化，以此改善其高强度和塑性，并增强耐SCC的能力(表3.1-56)。

表3.1-55 高强度、耐腐蚀的P/M铝合金的名义成分

合金	化学成分(质量分数,%)							
	Zn	Mg	Cu	Co	Li	O	C	Al
7090	7.3~8.7	2.0~3.0	0.6~1.3	1.0~1.9	—	0.00~0.50	—	余量
7091	6.8~7.1	2.0~3.0	1.1~1.8	0.20~0.60	—	0.20~0.50	—	余量
Al-9052	—	4.0	—	—	—	0.5	1.1	余量
Al-905XL	—	4.0	—	—	1.3	0.4	1.1	余量

表3.1-56 I/M和P/M高强度铝合金的典型室温性能

合金	耐SCC性		剥落评价[1]	最高抗拉强度		屈服强度[2]		50mm(2in)长的伸长率(%)	断裂韧度[3]	
	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi		$MPa \cdot m^{1/2}$	$ksi \cdot in^{1/2}$
铸锭冶金										
7075-T76	172	25	P, EA	524	76	462	67	12	29	26
7075-T73	290	42	P, EA	503	73	434	63	12	32	29

（续）

合金	耐SCC性		剥落评价①	最高抗拉强度		屈服强度②		50mm(2in)长的伸长率(%)	断裂韧度③	
	MPa	ksi		MPa	ksi	MPa	ksi		$MPa \cdot m^{1/2}$	$ksi \cdot in^{1/2}$
粉末冶金										
7090-T7E71	310	45	N，EA	621	90	579	84	9	26	24
7091-T7E69	310	45	N，EA	593	86	545	79	11	46	42

①ASTM剥落评价：N，无明显的侵蚀；P，点蚀——离散状或疤皮形；EA，可见的表面起皮；EB，较厚的表面侵蚀；EC，更严重的表面侵蚀；ED，最严重的表面侵蚀。 ②纵向方向。 ③纵-横向方向，按ASTM E 399。

机械合金化的合金Al-9052和Al-905XL（表3.1-55）也表现其环境温度的性能、耐腐蚀和SCC性的提高。合金Al-9052可以用氧化镁、氧化铝和碳化铝进行分散强化，用镁进行固溶强化以及通过其晶粒/亚晶粒组织的细化得以强化。合金Al-905XL也有类似的强化特点，尽管它能表现出因含锂析出物所导致的些许人工时效效应。表3.1-57列出Al-905XL锻件的性能，图3.1-41比较了RS、MA和I/M铝合金的耐SCC性。

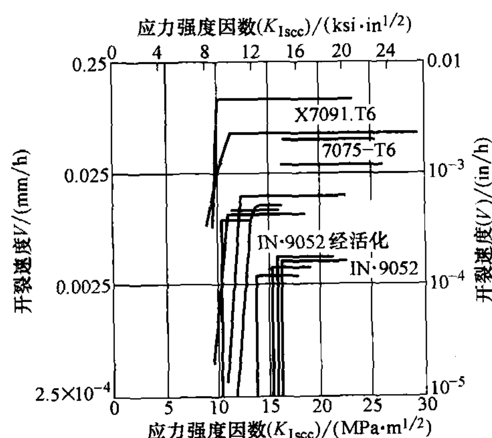


图3.1-41 P/M合金Al-9052/7090和7091及传统合金7075的开裂速度与应力强度因数间的关系。所有合金均处其最高强度状态

高温合金。传统的高强度I/M铝合金含有和一些移动位错相互作用的析出颗粒，故使其具有室温高强度。然而，当将这些合金置于高温里，析出颗粒就要发生溶解和/或粗化，以致降低其基体合金的强度。这种性质影响此类合金的高温应用。作为过共晶的Al-Fe-X成分（表3.1-58），RS-P/M合金借助弥散强化获得其高温强度；当将其置于高温里时，弥散颗粒能阻止上述溶解和粗化的发生。这些合金含有过渡金属和稀土金属，例如钼、镍、铈、钒和硅的三元和四元的合金添加。这种合金添加在α铝中表现为低固熔溶解度和低的固态扩散速率，于是它们就趋向于形成热稳定的弥散颗粒。这种制品的传统I/M工艺能产生一种在粗的α铝的基体中含有粗的Al_3Fe型初生金属间化合物颗粒的平衡或接近平衡的显微组织。这种显微组织所表现的塑性很差，故无法用于结构用途。与此相对照的，这些化学物质的RS-P/M处理工艺能遏制Al_3Fe型初生金属间化合物颗粒的形成。但不同的是，它产生的是一种呈现为细化的亚稳态显微组织的微粒，如Al_3-Al_6Fe型微共晶体和/或溶质过饱和枝晶状铝。换言之，RS-P/M工艺条件可由过共晶熔体产生细化的亚共晶类型显微组织。在后续的形变

表3.1-57 Al-905XL P/M锻件的典型力学性能

材料性能	方向	
	纵向	横向
抗拉强度		
MPa	517	483
ksi	75	70
屈服强度(0.2%条件)		
MPa	448	414
ksi	65	60
伸长率(%)	9	6
断裂韧度，K_{Ic}		
$MPa \cdot m^{1/2}$	30	30
$ksi \cdot in^{1/2}$	27	27
弹性模量		
GPa	80	—
10^6psi	11.6	—

表3.1-58　用RS-P/M生产的分散强化铝基合金的化学成分

名义化学成分(质量分数,%)	制　造　商
Al-8Fe-1.7Ni	Alcoa
Al-8.4Fe-3.7Ce	Alcoa
Al-9Fe-4Ce(AA8019 合金)	Alcoa
Al-9Fe-7Ce	Alcoa
Al-10Fe-5Ce	Alcoa
Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si(AA8009 合金)	AlliedSignal Inc.
Al-11.7Fe-1.2V-2.4Si(FVS1212 合金)	AlliedSignal Inc.
Al-8Fe-2.3Mo	Pratt & Whitney
Al-8.7Fe-2.8Mo-1V	Pratt & Whitney

热处理的过程中，直接凝固后的亚共晶显微组织经受固态相变并在α铝基体中生成很细(<1μm)的弥散颗粒。如图3.1-42所示，RS-P/M Al-Fe-X合金能100%地保持其在高达315℃(600 ℉)时的强度，而传统的I/M合金只能在同样温度保持其50%的强度，故一般不能在超过150℃(300 ℉)的温度下使用。

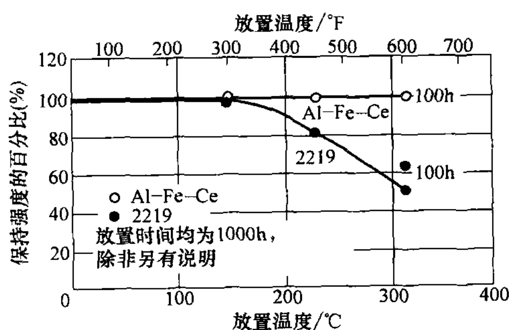


图3.1-42　Al-Fe-Ce合金经高温放置后，其室温强度得以保持的百分比

低密度-高刚性合金。它们含有能增加弹性模量或减小密度的合金化元素。锂和铍是仅有的两种能同时提高铝的这两种性能的元素，并且RS-P/M、MA以及喷射成形都已用于生产Al-Li和Al-Be-Li合金，喷射成形是一种高沉积速率的金属喷射工艺，它以相对较低的成本生产近净形零件。这种方法通过快速雾化使熔化金属形成一种很细的喷射液滴，并沉积在静止或移动的集淀器上。得到的预成形件里一般不会出现宏观偏析和前期颗粒边界，它偶尔会出现在I/M产品中。喷射成形工艺有助于扩增合金化元素的最大溶质含量，并实现第二相颗粒在等轴晶粒组织中的较细分布。这样的均质、低偏析和细等级的合金显微组织对于后面的轧制、锻造、挤压和超塑性成形加工工序都是十分有益的。喷射成形生产的合金能含有比I/M合金可能含有的更高锂含量(2.5% Li是I/M合金实际极限值)。例如喷射成形Al-Li合金包括Al-3.0Li-1.0Cu-0.7Mg-0.3Zr和Al-4Li-0.2Zr，它们二者都含有比普通使用的I/M Al-Li合金8090(Al-2.5Li-1.0Cu-0.7Mg-0.12Zr)更高的锂和锆含量。P/M Al-Li合金的比模量比8090的提高4.4%。

无论Al-Li还是Al-Be-Li合金，无一在商业应用上获得成功，这在很大程度上是因为I/M Al-Li合金的成功和金属基体复合物如Al-SiC和Al-TiB_2系统的开发。例如用P/M工艺生产的铝基体复合物，将在本篇第14章中论述。

精选参考文献

- R.B. Bhagat, Aluminum P/M Alloys and Composites, *Powder Metallurgy*, Vol 7, *ASM Handbook*, ASM International, 1998.
- Y.W. Kim and W.M. Griffith, Ed., *Dispersion Strengthened Aluminum Alloys*, TMS-AIME, 1988.
- E.W. Lee and N.J. Kim, Ed., *Light Weight Alloys for Aerospace Applications*, TMS-AIME, 1991.
- *Metal Powder Technologies and Applications*, Vol 7, *ASM Handbook*, ASM International, 1998.
- J.R. Pickens, High-Strength Aluminum P/M Alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, 1990, p 200–215.

第10节　铝和铝合金的耐腐蚀性

铝和大部分的铝合金在自然的气氛、淡水、海水、许多土壤、许多化学物质及其溶液以及大部分的食物里都有很好的耐腐蚀性。这种耐腐蚀性是因为在金属表面存在着一层非常薄且致密的，并与基体结合优良的氧化铝膜。一旦表面被刮或磨伤而使里面的新鲜表面无论处置在空气或水中，都会很快生成新的薄膜并达到稳定的厚度。在空气室温中形成的薄膜厚度为接近5nm(50Å)。这个厚度随温度的提高和水的出现而增加。氧化膜溶解于碱性溶液和强酸，也有例外，但是其在介质的pH值为接近4.0~9.0的范围里是稳定的。

存在着各种不同的腐蚀类型及其与引发或施加的应力之间的相互作用，因而造成的后果有从无关要紧到严重损坏的种种不同。对于某些应用，应当在外观和耐用性之间做出抉择。由于浅型点蚀所造成的粗糙使表面变得很难看，又因残留的脏污使表面变得灰暗，但是这些状况对于耐用度和功能倒没有影响。另

一方面，应力腐蚀开裂(SCC)或由于溶液里存在的重金属离子、杂散电流或者与更为阳极化的金属所构成电偶导致高度局部化的严重腐蚀，都具有十分严重的破坏性。良好的设计和应用实践必须注意防止这些情况的发生。这包括为适应使用条件而选用恰当的合金。

合金成分的影响

在这些主要的合金化元素(镁、硅、铜、锰和锌)中，铜对耐一般性腐蚀的能力的影响最大。铜之所以会降低这种能力是因为它作为细微金属颗粒从溶液中沉积出来并构成高活性的腐蚀偶。当铜的含量超过千分之几时，影响就突显出来了。在含有百分之几铜的、可热处理的 2*xxx* 或 2*xx.x* 合金中，固溶体或析出的状态将会影响腐蚀的种类以及对 SCC 敏感性。这种影响可以从表 3.1-59 和表 3.1-60 中看出，其合金/状态耐一般性腐蚀和 SCC 的评价得到了确认。

表 3.1-59 锻压铝合金耐一般性腐蚀和 SCC 能力的相对评价

合金		耐腐蚀	
编号	状态	一般[①]	SCC[②]
1060	全部	A	A
1100	全部	A	A
1350	全部	A	A
2011	T3，T4，T451	D[③]	D
	T8	D	B
2014	O	—	—
	T3，T4，T451	D[③]	C
	T6，T651，T6510，T6511	D	C
2017	T4，T451	D[③]	C
2018	T61	—	—
2024	O	—	—
	T4，T3，T351，T3510，T3511，T361	D[③]	C
	T6，T861，T81，T851，T8510，T8511	D	B
	T72	—	—
2025	T6	D	C
2036	T4	C	—
2117	T4	C	A
2218	T61，T72	D	C
2219	O	—	—
	T31，T351，T3510，T3511，T37	D[③]	C
	T81，T851，T8510，T8511，T87	D	B
2618	T61	D	C
3003	全部	A	A
3004	全部	A	A
3105	全部	A	A
4032	T6	C	B
5005	全部	A	A
5050	全部	A	A
5052	全部	A	A
5056	O，H11，H12，H32，H14，H34	A[④]	B[④]
	H18，H38	A[④]	C[④]
	H192，H392	B[④]	D[④]
5083	全部	A[④]	B[④]
5086	O，H32，H116	A[④]	A[④]
	H34，H36，H38，H111	A[④]	A[④]
5154	全部	A[④]	A[④]
5252	全部	A	A
5254	全部	A[④]	A[④]
5454	全部	A	A
5456	全部	A[④]	B[④]
5457	O	A	A
5652	全部	A	A
5657	全部	A	A
6053	O	—	—
	T6，T61	A	A
6061	O	B	A
	T4，T451，T4510，T4511	B	B
	T6，T651，T652，T6510，T6511	B	A
6063	全部	A	A
6066	O	C	A
	T4，T4510，T4511，T6，T6510，T6511	C	B
6070	T4，T4511，T6	B	B
6101	T6，T63，T61，T64	A	A
6151	T6，T652	—	—
6201	T81	A	A

（续）

合金		耐腐蚀		合金		耐腐蚀	
编号	状态	一般①	SCC②	编号	状态	一般①	SCC②
6262	T6，T651，T6510，T6511，T9	B	A	7075	T6，T651，T652，T6510，T6511	C③	C
6463	全部	A	A		T73，T7351	C	B
7001	O	C③	C	7178	T6，T651，T6510，T6511	C③	B

①评价是相对的，并且以其性能递减为序，以氯化钠断续喷洒或浸渍作为腐蚀方法。评价为A和B的合金能不加保护地应用于工业和沿海的大气中。评价为C、D和E的合金一般应该进行保护，至少在其接触面上。　②对耐应力腐蚀开裂是以使用经历和在实验室里通过试件在3.5% NaCl溶液里交替浸渍的试验方法进行评价的。A，在使用中或实验室试验中未见有失效案例；B，在使用中未见有失效案例，但在实验室的高度试件试验中发生有限的失效；C，当在使用中承受与晶粒组织呈高度方向的拉应力作用时发生失效，但在实验室的宽度试件试验中发生有限的失效；D，当在使用中承受与晶粒组织呈纵向方向或宽度方向的拉应力作用时，发生有限的失效。　③在相对较厚的截面中，评价将为E。　④这个评价与长期置于高温中的材料会有所不同。

表3.1-60　铸造铝合金耐一般性腐蚀和SCC能力的相对评价

合金		耐腐蚀		合金		耐腐蚀	
编号	状态	一般①	SCC②	编号	状态	一般①	SCC②
砂型铸造				**砂型铸造**			
208.0	F	B	B	710.0	T5	B	B
224.0	T7	C	B	712.0	T5	B	C
240.0	F	D	C	713.0	T5	B	B
242.0	全部	D	C	771.0	T6	C	C
A242.0	T75	D	C	850.0	T5	C	B
249.0	T7	C	B	851.0	T5	C	B
295.0	全部	C	C	852.0	T5	C	B
319.0	F，T5	C	B	**金属型铸造**			
	T6	C	C	242.0	T571，T61	D	C
355.0	全部	C	A	308.0	F	C	B
C355.0	T6	C	A	319.0	F	C	B
356.0	T6，T7，T71，T51	B	A		T6	C	C
A356.0	T6	B	A	332.0	T5	C	B
443.0	F	B	A	336.0	T551，T65	C	B
512.0	F	A	A	354.0	T61，T62	C	A
513.0	F	A	A	355.0	全部	C	A
514.0	F	A	A	C355.0	T61	C	A
520.0	T4	A	C	356.0	全部	B	A
535.0	F	A	A	A356.0	T61	B	A
B535.0	F	A	A	F356.0	全部	B	A
705.0	T5	B	B	A357.0	T61	B	A
707.0	T5	B	C	358.0	T6	B	A

（续）

合金		耐腐蚀		合金		耐腐蚀	
编号	状态	一般①	SCC②	编号	状态	一般①	SCC②
金属型铸造				**压铸**			
359.0	全部	B	A	380.0	F	E	A
B443.0	F	B	A	A380.0	F	E	A
A444.0	T4	B	A	383.0	F	E	A
513.0	F	A	A	384.0	F	E	A
705.0	T5	B	B	390.0	F	E	A
707.0	T5	B	C	392.0	F	E	A
711.0	T5	B	A	413.0	F	C	A
713.0	T5	B	B	A413.0	F	C	A
850.0	T5	C	B	C443.0	F	B	A
851.0	T5	C	B	518.0	F	A	A
852.0	T5	C	B	**金属转子③**			
压铸				100.1	—	A	A
360.0	F	C	A	150.1	—	A	A
A360.0	F	C	A	170.1	—	A	A
364.0	F	C	A				

①对耐一般性腐蚀的相对评价是以其性能递减为序的，以氯化钠断续喷洒或浸渍作为腐蚀方法。 ②对耐 SCC 是以使用经历和在实验室里通过试件在 3.5% NaCl 溶液里交替浸渍的试验方法进行评价的。A，在制造合适的使用中未见有失效案例；B，在残余应力或设计和装配应力低于大约45%的由使用规程规定的最小屈服强度的使用中，有意外发生的失效；C，以这种特定的合金/状态组合或与之同类型的合金/状态组合的使用中所发生的失效；设计者应当知悉，当这些合金和状态在不利条件下使用时，所潜在的 SCC 问题。 ③用于电动机转子。

铁在普通的杂质元素当中可能是最重要的，通过阴极体积比的增高和因中间金属相的显微组分削弱表面膜，从而会降低其耐一般性腐蚀的能力。

不含铜的 7*xxx* Al-Zn-Mg 合金具有很高的耐一般性腐蚀的能力。含有超过 1% Cu 的这一组合金，耐一般性腐蚀的能力较差，故应以适当的状态防止 SCC 的发生。

3*xxx* 一般也属于这些具有最高耐一般性腐蚀能力的合金，同样还有 5*xxx* 组里的合金，其在海水里的性能超过任何其他合金。6*xxx* 合金也拥有高耐腐蚀性能。

大气中的腐蚀

除了含铜量较高的合金外，其他合金都具有极佳的耐大气耐腐蚀性（常称为风化），而且在许多的户外应用中它们不要求任何保护或维护。需要在这样的条件下广泛应用的产品包括电导体、户外灯柱、桥梁栏杆和楼梯。它们常保持许多年的金属光亮外观，但是也会因浅型点蚀以及脏污堆积而造成表面的粗糙化，以致变得暗淡无光。

铝的风化及其在许多其他环境条件下腐蚀的一个重要特征就是腐蚀速度随时间而降低。图 3.1-43 所示是其处置在两种类型，即海岸的和工业的一般环境，均为 H14 状态的 1100、3003 和 3004 薄板试件经过长达 30 年的平均变化的典型曲线。它们的腐蚀程度无论用重量的减少、点蚀的深度还是强度的下降表示，其曲线的形状都十分相似。曲线的转折通常发生在 6 个月到 2 年，此后其速率变为低速的近似线性。在乡村的大气中，其失重率低于 0.025μm/a（0.001mil/a）（此处所示的长度单位值由质量折算，假定表面均匀腐蚀——译者注）。在工业地区，其失重率从接近 0.75 到 2.75μm/a（0.03 ~ 0.11mil/a）不等，并在其个别侵蚀性特别严重的地方按照最大点蚀深度还可观察到腐蚀率高达 12.5μm/a（0.5mil/a）。表 3.1-61 是锻压铝合金 1100-H14 的大气腐蚀率与工业纯铜、铅和锌的比较。

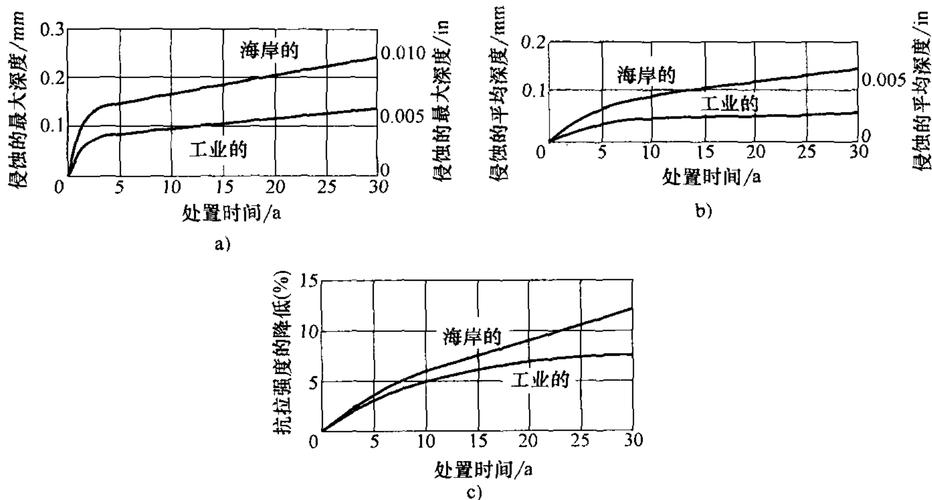


图3.1-43　合金1100、3003和3004(分别见a、b和c的曲线)**的腐蚀深度和抗拉强度的下降**。所提供的数据为这三种合金的平均性能，它们的状态都为H14。海岸暴露是在严重的地方(Pt. Judith, RI)；工业的暴露是在New Kensington, PA。抗拉强度利用初始横截面面积进行计算，强度的下降则表示为初始拉伸形变强度的百分比。

表3.1-61　铝与其他非铁金属在严重的处置场合中的大气腐蚀率

地　区	大　气	下列金属试件经所示时间长度的处置后其单面被除去的金属厚度①/(μm/a)							
		铝②		铜③		铅④		锌⑤	
		10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年
Phoenix, AZ	沙漠	0.000	0.076	0.13	0.13	0.23	0.10	0.25	0.18
State College, PA	乡村	0.025	0.076	0.58	0.43	0.48	0.30	1.07	1.09
Key West, FL	海岸	0.10	—	0.51	0.56	0.56	—	0.53	0.66
Sandy Hook, NJ	海岸	0.20	0.28	0.66	—	—	—	1.40	—
La Jolla, CA	海岸	0.71	0.63	1.32	1.27	0.41	0.53	1.73	1.73
New York, NY	工业	0.78	0.74	1.19	1.37	0.43	0.38	4.8	5.6
Altoona, PA	工业	0.63	—	1.17	1.40	0.69	—	4.8	6.9

①根据失重计算，假定为均匀侵蚀，试件板厚为0.89mm(0.035in)。　②铝1100-T14。　③韧铜(99.9% Cu)。　④工业铅(99.92% Pb)。　⑤优质西部锌。

许多年来，4*xx.x*和低铜3*xx.x*合金铸件一直应用于桥梁护栏支座和灯柱底座一类的用途里，几乎没有遭受腐蚀的不利影响。含有4%~8% Mg的5*xx.x*铸造合金，特别适用于船舰和在海水中的铸造零件。一些含铜合金如295.0、333.0、380.0甚至355.0，都要求有表面保护才能应用于腐蚀性海洋和工业大气中。处于大气中的7*xx.x*合金和合金520.0-T4受力零件，有时会发生应力腐蚀开裂。为防止这类问题，这些合金的应用必须予以精心设计。

水中的腐蚀

铝在高纯度水、蒸馏水或去离子水以及蒸汽冷凝水中的耐腐蚀性非常高，以致这些流体常用铝制的设备盛装和处理。铝在大部分天然淡水中的耐腐蚀性也很强。在软水中，发生点蚀的可能性最小。天然水中，会增加点蚀的组分有铜离子、碳酸氢盐、氯化物、硫酸盐和氧。因此，含有较多碳酸氢盐、较硬的水发生点蚀的倾向性也越大。

铝合金在船舰上和海岸边的应用实践包括各种构件、浮标、管道、救生艇、小汽艇、游艇、巡逻艇、驳船以及较大的船只，在其部分、间断或全部浸没的使用过程中，都表现出良好的耐腐蚀性和很长的寿命。3*xxx*、5*xxx*和6*xxx*组的锻压铝合金都可以使用。其中5*xxx*铝镁组的合金具有最强的耐腐蚀性，并且由于其良好的强度和焊接性而应用最为广泛。按失重，其腐蚀率不超过近5μm/a(0.2mil/a)，它还不及未加保护的低碳钢在海水中腐蚀率的5%。其腐蚀

主要为点蚀，随时间而减速，从第一年的腐蚀率2.5～5μm/a(0.1～0.2mil/a)到以后的十年期间的平均腐蚀率为0.75～1.5μm/a(0.03～0.06mil/a)。点蚀的最大深度相对于时间的曲线近似遵循立方根的规律，据此，材料加厚一倍将增加蚀透时间8倍。

含有高达8%的Mg5*xx*.*x*组的铸造合金具有很高的耐海水腐蚀能力，并应用于各种配件。Al-Si和Al-Si-Mg合金的耐腐蚀性稍差，尽管443.0和356.0-T6也时有应用。合金2*xxx*、2*xx*.*x*、7*xxx*和7*xx*.*x*的耐腐蚀性明显不行，故不推荐在不进行涂敷或金属化的情况下使用它们。

土壤中的腐蚀

土壤在矿物质含量、织构、透气性、湿度、pH值、电导率及磁导率、有机物和微生物等很多方面都各不相同。由于这种差异性，未加保护而埋在土壤里的铝就像其他金属一样，其耐腐蚀的性能也有相当大的不同。然而在许多使用碳钢需要保护性涂层的情况里，若改用未加保护的铝合金就能很好地发挥作用。在大多数情况下，需要在土壤里埋覆的用途中都建议予以保护。一般不推荐使用2*xxx*或7*xxx*合金或它们对应的铸造合金。还应该避免有杂散电流以及与更为阴极化的金属相接触。成功的应用案例有应用于管道上的合金3003、6061和6063，以及用于制造下水道的包铝合金3004。

暴露于食物中

3*xxx*和5*xxx*组的铝合金具有在大部分的食物和饮料中的耐腐能力。铝制品在家用厨房用具市场中占有相当大的份额，并且广泛应用于食物的商业性储运和加工。在食物和饮料的包装中大量使用铝箔、层压在塑料及纸上的铝箔和铝罐。饮料罐的罐体一般用合金3004，食物罐的罐体用5352或5050，而罐盖用5182。这些罐的内外一般都有有机涂层，并非为防腐蚀而是用于装饰和防止对食品味道的影响。

暴露于化学物质中

铝合金可应用于各种化学产品的储存、加工、搬运和包装。它们与大部分的干无机盐相兼容。在钝化的pH值约为4～9时，它们具有在大部分的无机化学物质溶液里的耐腐蚀性，但是在含气溶液中会遭受点蚀，尤其是卤化物。铝合金用于盛装或处置无机酸并不适合，但是质量分数超过82%的硝酸和质量分数从98%～100%的硫酸当属例外。

铝合金能耐大部分的酒精类物质，但是也有一些会在极为干燥和高温的情况下发生腐蚀。酚类物质也有类似的特征。醛类物质所产生的腐蚀影响极小甚至没有。将铝用于卤代有机化合物时必须小心，因为在某些存在潮湿的条件下，会发生水解和剧烈的反应。

铝及其合金对于许多食物和化学物质的耐腐蚀性均以实验室的试验为其依据，并以此实际代表其所有的类别，在很多情况下也有根据其使用经验进行确定的。从各种手册、适合的文献和商贸协会发布的资料中，也不难获得所需的数据(如由铝业协会发布的《铝应用于食物和化学物质的指南》)。

暴露于非金属建筑材料中

被长期埋置在波特兰水泥(普通硅酸盐水泥——译者注)混凝土、支座或石灰砖的砂浆、硬墙石膏或灰墁中的铝合金不会发生严重腐蚀。这些产品在成形过程中会使铝的外表发生腐蚀，但是硬化之后，进一步的侵蚀将变为最小。环境污染从混凝土与金属间的缝隙进入的部位应当特别考虑予以保护。例如，高速公路的护栏和路灯支座或支柱通常都要在其混凝土固定处涂以密封剂，用于防止充满盐化的马路飞溅污物进入缝隙。

一些与铝接触并具有吸收性的材料如纸、木屑和墙板会在使其潮湿的条件下使铝发生腐蚀。一些采用粘结复合材料绝缘的铝板要在其内侧使用防潮剂，用于防止绝缘层发生冷凝和潮湿。有些绝缘材料(如氧化镁)是碱性的，对铝的腐蚀性很强。氯氧化镁作为一种用于地道、铁路机车车厢和船上甲板的地面涂料，极具腐蚀性，不能与铝在一起使用。虽然木料通常是无腐蚀性的，但是如果其湿度超过18%～20%就变成腐蚀性的了。含有铜的木料防腐剂是有害的，含有汞的防腐剂也不应该用于有铝的地方。

腐蚀的形式

腐蚀的形式和种类可以按其形态分类，这种形态可以与金属的显微组织有关系，也可以没有关系；或按照造成腐蚀的条件分类。如果表面氧化膜在腐蚀介质中是可溶解的，就会发生均匀的侵蚀或溶解，对此在使用中并不常发生。使用中的腐蚀大多仅限于以这种或那种的方式发生。当氧化膜在腐蚀性介质中是不可溶的时，腐蚀仅限于发生在膜的薄弱处，这是由显微组织的特点如一些显微组分的存在而造成的。局部原电池是由金属上的一些非均匀性以及环境中的非均匀性所形成的，例如由差异充气电池所造就的；或由镀覆在表面外的重金属所构成的。从显微意义上看，局部腐蚀是由原电池和杂散电流的效应所造成的。

点蚀。这是局部腐蚀中最普通的形式，通常也很难将其与特定的金相特征挂钩。点蚀的形状可以从浅型的凹坑到圆柱形或近似半球形的坑穴而不同。这些形状可用于分辨点蚀是晶间腐蚀还是剥落腐蚀。超纯铝具有最强的耐点蚀性，而 1*xxx* 和 1*xx.x* 铝的耐点蚀性，则随其纯度的提高而增强。在工业合金中，5*xxx* 组合金发生点蚀的可能性最小，而 3*xxx* 组次之。

晶间腐蚀。这是一种在晶界上发生的选择性侵蚀。其机理是一种由晶界局部原电池作用引起的电化学机制。在晶粒边界上析出的显微组分具有与邻近固溶体和过渡析出物不同的腐蚀电位，并与之形成原电池。在 5*xxx* 和 7*xxx* 组的合金里的析出物（Al_8Mg_5、$MgZn_2$和 $Al_2Mg_3Zn_3$）相对于其基体都呈阳极的。在 2*xxx* 合金中的析出物（Al_2Cu 和 Al_2CuMg）则呈阴极的。这两种情况都会发生晶间腐蚀。其敏感性取决于晶间析出的程度，可以借助制造工艺或热处理的参数对其进行控制。

2*xxx* 合金中的晶界析出是由在热处理的淬火工序中的不适当冷却速度所致。厚截面产品无法通过足够快的冷却速度来完全避免其 T3-或 T4-型状态对晶间腐蚀的敏感性。其 T6-或 T8-型的状态具有高得多的耐这种侵蚀的能力。具有镁/硅平衡比（按 Mg_2Si 比例）的 6*xxx* 组合金不会呈现晶间腐蚀的倾向，硅含量超过 Mg_2Si 比的合金会有较高的这种腐蚀敏感性。7*xxx* 组合金也会发生晶间腐蚀，通过对其 T7-状态的过时效，可得到很高的耐晶间腐蚀性。

因为晶间腐蚀属于铝合金的 SCC（见后面的讨论），它常被认为比点蚀或一般（均匀）腐蚀更具危害性。然而，在一些对 SCC 并不敏感的合金里，例如 6*xxx* 系列合金，晶间腐蚀通常不会比点蚀更严重，且趋于随时间减缓；对于相同的腐蚀深度，晶间腐蚀对强度的影响不会大于点蚀腐蚀，虽然在晶间腐蚀区域比在随机的点蚀处更容易引发疲劳裂纹。

剥落腐蚀。这是一种选择性的侵蚀，它在亚表层的诸多层面上沿着与表面差不多平行的方向延伸。它可以是晶间的，但也是与不可溶的层状显微组分以及平行于产品表面的弥散物分布带有关。它在具有纤薄截面的产品中是最为常见的，而且其金相组织曾经受过强压力加工、平压和延伸。其特征表现为剥离或脱层，并伴有因腐蚀生成物的膨胀而造成的表面隆起，而且在金相切片上显现（见图 3.1-44）。剥落往往是从剪切的刃面上延续，而且是在点蚀表面上起始的。它不会因应力作用而得到加速，但是会因稍微稀释酸溶液和原电池作用而受到强化。

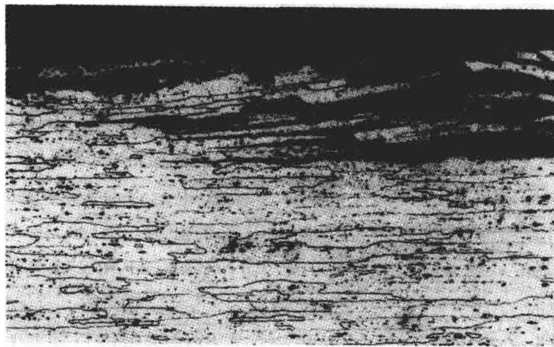


图 3.1-44　处于海岸环境中的合金 7178-T651 板材的剥落腐蚀。板材的横截面表明腐蚀如何沿薄而被拉长的晶粒边界发展成为剥落

2*xxx* 和含铜 7*xxx* 合金的剥落受截面厚度和相应显微组织的影响相当大，还要受其状态的影响。2*xxx* 合金只有在 T3-和 T4-型的状态下才会对剥落产生敏感，而在 T6-和 T8-型的状态下，则具有耐剥落腐蚀性。含铜 7*xxx* 组合金通过超峰值强度的过时效处理（T6-型的状态），可以使这种耐腐蚀性得到很大的提高，于是这些材料的 T7-状态都有耐腐蚀性。在这类热处理合金的挤压件里，邻近表面的再结晶外围区常具有很高的耐剥落性，而在其下面的非再结晶部分，则极易遭受这种侵蚀。

1*xxx* 铝和 3*xxx* 合金在所有的状态下都有很高的耐剥落腐蚀性。经重度冷变形加工的高镁 5*xxx* 合金，如 5456-H321 的船身用板材已发现剥落的发生。改善其状态（H116 和 H117）就可以形成很高的耐腐蚀性。

电化学腐蚀。前面所讨论的腐蚀在本质上大都属于电化学作用，并且由显微组织或环境因素构成原电池。还有许多由其他条件形成的电位差会使腐蚀强化和发生局部腐蚀。与较为惰性的金属或与非金属导体（如石墨）的电接触会造成这种加速腐蚀，即所谓的“电腐蚀”。最为常见的例子就是当铝合金与钢或铜连接在一起，并处于潮湿和含盐的环境里。铝在这种情况下比起在没有同异类金属存在的情况下腐蚀得更快。

在每一种的介质里，金属都能按照从最活跃到最不活跃的电序列进行排列。表 3.1-62 所示就是在氯化钠溶液中测量到的电位。当两种金属偶合在一起时，其腐蚀的速度取决于下列因素：①电位差；②金属间的电阻；③电解液的电导率；④阳极/阴极面积比；⑤金属的极化特征。虽然腐蚀电位可用于预计哪一种金属将会被电腐蚀，但电腐蚀的程度却因为极化作用而无法预估。例如，铝和不锈钢之间的电位差大于铝和铜之间的，然而由于极化作用不锈钢对铝的电化学效应远小于铜的，因为铜几乎没有这种极化作用。

表3.1-62　代表性的铝合金及其他金属的电极电位

铝合金①或其他金属	电位②/V	铝合金①或其他金属	电位②/V
铬	+0.18，-0.40	2219-T6，6061-T4	-0.80
镍	-0.07	2024-T6	-0.81
银	-0.08	2219-T8，2024-T8，356.0-T6（S或PM），443.0-F(PM)，镉	-0.82
不锈钢(300系列)	-0.09		
铜	-0.20	1100，3003，6061-T6，6063-T6，7075-T6③，443.0-F(S)	-0.83
锡	-0.49		
铅	-0.55	1060，1350，3004，7050-T73③，7075-T73③	-0.84
低碳钢	-0.58		
2219-T3，-T4	-0.64③	5052，5086	-0.85
2024-T3，-T4	-0.69③	5454	-0.86
295.0-T4(S或PM)	-0.70	5456，5083	-0.87
295.0-T6(S或PM)	-0.71	7072	-0.96
2014-T6，355.0-T4(S或PM)	-0.78	锌	-1.10
355.0-T6(S或PM)	-0.79	镁	-1.73

①铝合金的电位在所有的状态下都一样，包括其尚未规定的状态。S为砂型铸造，PM为金属型铸造。　②在25℃且每升含53g的氯化钠和$3gH_2O_2$的水溶液中进行测量。　③根据其淬火速度，电位从±0.01～0.02V变化。

在包括盐溶液的自然环境里，锌相对铝呈现为阳极，并首先被腐蚀，故起到对铝的保护作用。镁也有保护性，虽然在严重的海水介质中，它也会因为碱性反应而造成铝的腐蚀。镉对于铝是中性的，故铝能安全地用于与之接触。铜和铜合金，如黄铜、青铜和镍铜都是最有害的，紧接着的是在盐溶液中的碳钢。镍比铜的侵蚀性要小一些，像电镀铬一样，它在效果上接近不锈钢。铅能与铝一起使用，但除了在船舰环境里使用以外。

杂散电流腐蚀。电流一旦从铝流向介质如水、土壤或混凝土，铝就会按照电流的比例在阳极反应区被腐蚀。在低电流密度下，腐蚀以点蚀的方式发生，在较高的电流密度下将发生相当大的金属破坏，而且其腐蚀的速度也不会随时间而降低。

铝在土壤里的杂散电流腐蚀会由于与其他埋覆的金属系统的紧密贴近而引起，而该系统接受外加电流的阴极保护系统的保护。地面电流会从某一点泄漏进入所埋覆的铝构件，然后从其发生腐蚀的另一点流出。采取的保护是在加入的埋覆阳极与受保护的邻近构件之间取一条作为电阻较小的路径。故所有紧密贴近的埋覆金属系统之间通常都应采取以上方法防止发生这类侵蚀。

沉积腐蚀。这是一种会引起点蚀的特殊形式的电化学腐蚀。当来自溶液中相对更为阴极的金属上的颗粒镀在铝表面上时，就会发生这种腐蚀，造成的腐蚀起源于局部原电池。侵蚀铝的离子有铜、铅、汞、镍和锡，即通常所谓的重金属。它们在酸性溶液中的影响比较大，但是在溶解度很低的碱性溶液中的影响就非常小。

铜离子是铝在应用中造成这种腐蚀最普通的缘由。例如，从屋顶的铜挡水板流下的雨水会造成铝排水沟的腐蚀，尽管两种金属之间并没有电学上的接触。溶液中含有非常少量的铜(低至0.05ppm)也可能是有害的。含铜合金的这种耐一般性腐蚀的性能低下是因沉积腐蚀所致，而沉积腐蚀又是铜从溶解的腐蚀生成物中析出而造成的。

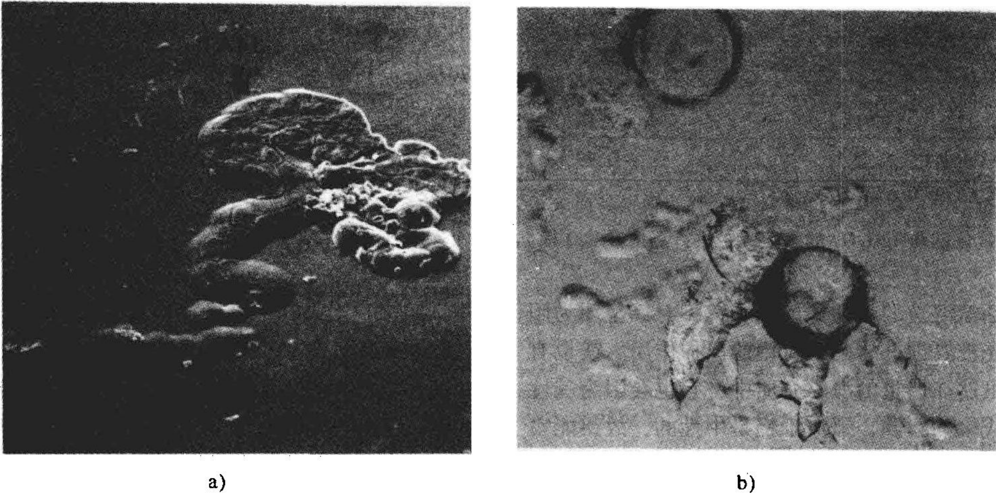
汞是对铝侵蚀性最大的离子，甚至微量的存在也会造成严重的问题。液态汞并不能湿润铝，但是如果铝表面天然生成的氧化膜被损坏，铝就会在汞里溶解，生成汞齐，从而导致灾难性腐蚀反应。在腐蚀溶液中，超过十亿分之几的汞浓度都是不应忽视的因素。

缝隙腐蚀。如果在由两个面对面的铝表面或者由一个铝表面与一个非金属材料如垫片所构成的缝隙中存在电解液，就会发生呈现为麻点或蚀斑形的局部腐蚀。这是形成浓差电池或差异充气电池所造成的结

果。在薄板或箔的卷料、或在平薄板或圆片包装的叠层之间发生的锈蚀是由同样的机制所造成的，并以此作为更加严重腐蚀的起始，以致造成其叠层间分离的困难。通过确保产品的初始干燥或防止潮汽的进入，如保护其免受冷凝、雨水以及其他污染源的侵蚀，就能预防这样的损坏发生。

丝状腐蚀。有时也称为“蜗痕”腐蚀，当铝表面涂有有机涂层并暴露于温暖、潮湿的大气里时，就会发生这种腐蚀。其腐蚀呈现为螺旋形的细丝，它们起始于有机涂层的缺陷处并为氯化物所活化，随后沿着金属与涂层的界面以 1mm/d(0.04in/d) 的速度生长。细丝的移动端称为头，其痕迹的遗留部分称为尾(见图3.1-45a)。在暴露于海面和其他高湿度的环境中的飞机油漆表面(见图 3.1-45b)上发生的丝状腐蚀，将通过使用化学改性涂层、阳极化或在末道涂层之前使用铬酸盐防腐底面涂层进行控制。

应力腐蚀开裂。在持续拉应力和腐蚀环境的综合作用下的与时间有关的开裂用 SCC 表示。在实质上，遭受以晶间腐蚀为其特征的 SCC 的铝制品仅仅出现在 2*xxx*、7*xxx*、5*xxx*(超过3% Mg)和 6*xxx*(过量的硅)的一些较高强度合金及其状态。用这类合金及其不同状态，并根据其拉应力方向而制造的铝制产品的相对耐腐蚀性可以用表 3.1-63 所列的评价来表示。在使用 1*xxx* 铝或 3*xxx*、6*xxx*(按 Mg_2Si 比)或 5*xxx*(含 3% Mg 或以下)合金时，不会遇到任何 SCC 的问题。表 3.1-63 中包括的 6061-T6 是一种平衡比合金。



a)　　　　b)

图 3.1-45　铝的丝状腐蚀例子

a) 用聚氯乙烯涂层的铝箔，图示丝状元的前沿头部和开裂尾部。SEM. 80 ×

b) 飞机外皮的铝油漆表面的丝状腐蚀

表 3.1-63　高强度铝合金锻压产品耐应力腐蚀开裂能力的相对评价

合金和状态①	试验方向②	轧制厚板	圆棒和棒材③	挤制型材	锻件	合金和状态①	试验方向②	轧制厚板	圆棒和棒材③	挤制型材	锻件
2011-T3，-T4	L	④	B	④	④	2024-T3，-T4	L	A	A	A	④
	LT	④	D	④	④		LT	B⑤	D	B⑤	④
	ST	④	D	④	④		ST	D	D	D	④
2011-T8	L	④	A	④	④	2024-T6	L	④	A④	A	
	LT	④	A	④	④		LT	④	B	④	A⑤
	ST	④	A	④	④		ST	④	B	④	D
2014-T6	L	A	A	A	B	2024-T8	L	A	A	A	A
	LT	B⑤	D	B⑤	B⑤		LT	A	A	A	A
	ST	D	D	D	D		ST	B	A	B	C

（续）

合金和状态①	试验方向②	轧制厚板	圆棒和棒材③	挤制型材	锻件
2124-T851	L	A	④	④	④
	LT	A	④	④	④
	ST	B	④	④	④
2219-T3，-T37	L	A	④	A	④
	LT	B	④	B	④
	ST	D	④	D	④
2219-T6，-T8	L	A	A	A	A
	LT	A	A	A	A
	ST	A	A	A	A
6061-T6	L	A	A	A	A
	LT	A	A	A	A
	ST	A	A	A	A
7005-T53，-T63	L	④	④	A	A
	LT	④	④	A⑤	A⑤
	ST	④	④	D	D
7039-T63，-T64	L	A	④	A	④
	LT	A⑤	④	A⑤	④
	ST	D	④	D	④
7049-T73	L	A	④	A	A
	LT	A	④	A	A
	ST	A	④	B	A
7149-T73	L	④	④	A	A
	LT	④	④	A	A
	ST	④	④	B	A
7050-T74	L	A	④	A	A
	LT	A	④	A	A
	ST	B	④	B	B
7050-T76	L	A	A	A	④
	LT	A	B	A	④
	ST	C	B	C	④
7075-T6	L	A	A	A	A
	LT	B⑤	D	B⑤	B⑤
7075-T6	ST	D	D	D	D
7075-T73	L	A	A	A	A
	LT	A	A	A	A
	ST	A	A	A	A
7075-T736	L	④	④	④	A
	LT	④	④	④	A
	ST	④	④	④	B
7075-T76	L	A	④	A	④
	LT	A	④	A	④
	ST	C	④	C	④
7175-T736	L	④	④	④	A
	LT	④	④	④	A
	ST	④	④	④	B
7475-T6	L	A	④	④	④
	LT	B⑤	④	④	④
	ST	D	④	④	④
7475-T73	L	A	④	④	④
	LT	A	④	④	④
	ST	A	④	④	④
7475-T76	L	A	④	④	④
	LT	A	④	④	④
	ST	C	④	④	④
7178-T6	L	A	④	A	④
	LT	B⑤	④	B⑤	④
	ST	D	④	D	④
7178-T76	L	A	④	A⑤	④
	LT	A	④	A	④
	ST	C	④	C	④
7079-T6	L	A	④	A	A
	LT	B⑤	④	B⑤	B⑤
	ST	D	④	D	D

注：耐SCC能力评价如下：A，非常高，使用中从无问题记录，可预期在其一般的应用里都不会发生应力腐蚀开裂；B，高，使用中从无问题记录，可预期在由固溶热处理引起的幅度大小的应力作用下，不会发生应力腐蚀开裂，必须小心防止承受由任何综合原因，包括热处理、校直、成形、装配以及经受运行加载，所产生的高拉应力（超过规定最小屈服强度的50%）；C，中等，如果承受的总拉应力维持在规定的最小屈服强度的25%，就可以预期不会发生应力腐蚀开裂，该评价专指主要应用于具有高耐剥落腐蚀性的相对较薄结构件产品的高度方向上，因为在这种构件的高度方向上未必有可观的应力；D，低，在任何应用中，包括沿指定试验方向承受的拉应力，都预期会发生由应力腐蚀开裂造成的失效，该评价目前仅指某些产品的高度方向。

①评价用于标准轧制件，其状态如表中所示，还有Tx5x和Tx5xx（应力消除）的状态，但是它在某些由于使用非标热处理或在室温下由用户进行机械变形的一些情况里也许不适用。　②在典型锻压合金中，将应力相对其具有方向性的晶粒组织所作用的方向作为其试验方向的取向，但对于挤压件和锻件，无法根据产品的横截面形状来预测晶粒组织的方向：L，纵向；LT，宽度；ST，高度。　③宽厚比≤2的截面，其LT和ST的性能没有区别。　④评价未定，因为市场没提供产品。　⑤对于截面较厚的，评价类别要取低一些：挤压件，25mm（1in）及以上，厚板和锻件40mm（1.5in）及以上。

一般来说，当应力方向平行于纵向或宽度方向时，高拉应力是开裂的先决条件。当拉应力沿着高度方向(垂直于厚板的表面或横越模锻件的飞边平面)时，作为一种敏感的合金/状态组合，即使在相对较低的应力下也会发生 SCC。不但能在潮湿的空气中发生开裂，而且在侵蚀性和含氯化物的介质里更要加速其进程。

由于 SCC 与其方位有关，故将沿其最敏感方向的应力降低到最小是很重要的。除了由作用载荷所引起的应力以外，由淬火或成形以及任何因过盈配合和配合不良的装配所造成的残余应力都必须予以重视。尽量减小这类沿高度方向的应力，能使敏感的合金/状态组合发生 SCC 失效的可能性大大降低。建议采用耐腐蚀状态。

对于细薄截面的产品，在其高度方向只引起很小或不引起任何应力的使用条件下，T3 或 T4 状态的 2*xxx* 合金或者 T6 状态的 7*xxx* 合金常都能获得令人满意的耐 SCC 性。至于轧制、挤制或锻造的粗厚截面的产品，在沿其高度方向或横越模锻件的飞边平面上的耐 SCC 性通常会影响它们的应用。过时效的消除应力处理尽管会牺牲一些强度，但是在为 T73、T736 和 T74 状态的含铜 7*xxx* 合金——7075、7175、7475、7049 和 7050，提供高耐 SCC 性方面却是非常有效的。高强度 2*xx.x* 合金铸件通过过时效达到 T63 ~ T7 状态能获得优良的耐 SCC 性；T6 状态的 2219 根据强度进行类似的过时效，也能获得高耐 SCC 性。

中等强度的无铜和低铜合金 7*xxx* 组可能有对 SCC 的敏感性。作为防护板，获得成功应用的耐 SCC 性较差的 7039 要求对高度应力和堆焊进行控制。含铜量高达 1% 的合金 7016、7021 和 7029 具有很好的成形性和精轧性能，故在汽车的用途如保险杠上得到应用。通过水骤冷(W)状态的成形并继之以两步时效，便可以获得最高的耐 SCC 性。7*xx.x* 组的铸造合金具有与前述锻压合金相似的成分，在它们的应用中偶尔也会遇到一些 SCC 的问题。

腐蚀疲劳。铝合金在如海水和其他盐溶液的腐蚀介质中的疲劳强度要低于其在空气里的，当用低应力、长耐用度的试验进行测评时尤为如此。这种腐蚀介质使耐腐蚀性强的合金，如 5*xxx* 和 6*xxx* 系列疲劳强度的降低要小于其使耐腐蚀性差的合金如 2*xxx* 和 7*xxx* 系列疲劳强度的降低。

就像 SCC，腐蚀疲劳要求有水的存在。然而对照 SCC，腐蚀并不受试验方向的显著影响，因为由这种侵蚀所造成的断裂很明显是属于穿晶型的。

氢脆。直到最近才认定氢会使铝脆化。许多年以来，铝和铝合金的介质开裂都是以 SCC 为代表的，通过在特定氢介质中的试验揭示了铝对于氢损坏具有敏感性。铝合金的氢损坏有晶间开裂、穿晶开裂或起泡爆皮等形式。起泡爆皮最常见的是与铝的熔化和热处理有关系，这时它与水蒸气发生反应并产生氢气。因氢气而发生的起泡爆皮常与晶界析出物或微小气孔的形成有关。这种铝合金的起泡爆皮与铁合金的差别在于在铝里较常见的是靠近表面有众多的气孔聚集而生成大的气泡。

氢气以与铁基合金相似的机制扩散进入铝的晶格里，并经集中成为内部瑕疵。它更多地在时效硬化之前发生在空气炉里退火和固溶处理的过程中。

对铝氢脆的大部分研究都集中在 7*xxx* 合金上，因此铝合金的氢损坏问题还没有达到完全解决的程度，其机理也尚未完全搞清。

浸蚀腐蚀。在非腐蚀性的介质如高纯净水中，较强的铝合金具有较高的耐浸蚀腐蚀性，因为这种耐浸蚀腐蚀性几乎完全受系统的力学元素所控制。在腐蚀性的环境如海水中，腐蚀性元素变为控制因素，于是对于耐腐蚀性较高的合金，即使强度较低其耐浸蚀腐蚀性也比较高。防腐剂和阴极防腐都适用于将铝合金遭受的浸蚀腐蚀、冲蚀和气蚀降到最低限度。

连接处的腐蚀

利用机械固紧——螺栓、螺钉、冷打头铆钉和螺纹的连接——或利用压力或粘合剂的粘结都要求特别小心，防止电化学效应、裂隙腐蚀以及在会对 SCC 产生敏感的产品中留下装配应力。连接方法还包括热态——焊接、硬钎焊和软钎焊——会使与熔化区相毗邻的母体材料的金相组织发生变化并引起特定连接部分与母体金属之间的成分差异。这些问题特别在可热处理合金中有可能是产生电化学效应的缘由，从而成为选择适当连接材料的一个重要因素。

包覆产品

在包覆铝产品中，其心部合金与包覆合金之间的溶体电位差用于作为一种对心部材料的阴极保护。主要用作薄板和管制品的这类产品，是由具有单面或双面涂层的心部和一种冶金结合的合金层所构成的，该冶金结合层对其心部合金是呈阳极的。包覆层的厚度通常小于产品全厚度的 10%。包覆合金一般是非热处理型的，虽然有时为获得较高的强度也有使用可热处理合金的。心部合金与包覆合金的成分关系规定为包覆层的阳极需超过(即其阳极的电位需低于——译者注)其心部的 80 ~ 100mV。表 3.1-64 所列的是一些

普通包覆产品的心部合金/包覆合金的几种组合。由于包覆层提供的阴极防护，腐蚀仅仅在心部/包覆的界面上进行，并随后沿横向延伸。这对于防止在薄层产品上发生穿孔有很好的效果。

表3.1-64 一些包覆产品所用的铝合金组合

心部合金	包覆合金
2014	6003或6053
2024	1230
2219	7072
3003	7072
3004	7072或7013
6061	7072
7075	7072、7008或7011
7178	7072

防护层

铝合金产品使用油漆和其他涂层起到装饰和保护的目的。几乎所有应用于金属的油漆(丙烯酸的、烷基的、聚酯的、乙烯基的等)都能适用，如果使用得当，用于铝的特定油漆性能要好于其用于钢的性能。像任何一种金属一样，其表面的处理是很重要的。无论是铬酸盐还是磷酸盐的转化膜都能推荐用于铝合金的预置处理。对于较为缓和的环境可以将油漆作为转换化膜使用，对于较为侵蚀性如含有氯化物的环境，应当首先使用一种铬酸盐作为底层涂料。铝合金特别适合用水溶性漆，出于环境方面的考虑这种漆的使用日益增加。现在市场上已经有许多预涂成不同颜色的产品，并应用于农业、工业及住宅的用途。

虽然阳极化膜比较昂贵并限于设备上应用，但它还是能为铝合金提供非常好的保护。有时它们也作为油漆的底层使用。外墙采用阳极化铝合金的许多标志性建筑物，足以证明这种材料在风化条件下的耐用性。阳极化膜还能提供不同的色泽，最普通的灰色和古铜色护板就是通过选择合金和阳极化工艺的而生产的。

阳极化膜是利用电解工艺生成的，作为阳极的合金表面转化为氧化铝，这种氧化物被结合在合金上，它像天然氧化膜一样的坚韧，并且厚实得多。具有耐腐蚀性的膜厚从5~30μm(0.2~1.2mil)不等，再厚的涂层几乎也增加不了什么防腐蚀性。就像合金本身一样，阳极化涂层对于大部分pH值为4~9以外的环境并不具有防腐蚀性。而在此范围内的耐腐蚀性可以提高一个数量级或以上，大气风化试验表明基体金属上出现的麻点数量随膜厚的增加以指数减少。

精选参考文献

- J.R. Davis, Ed., Corrosion Behavior, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993, p 579–622.
- E.H. Hollingsworth and H.Y. Hunsicker, Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 583-609.
- B.F. Lifka, Aluminum (and Alloys), *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation*, R. Baboian, Ed., ASTM, 1995, p 447–457.

第2章 铜和铜合金

本章的内容采自不同的来源，包括《ASM手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，216~427页；《ASM手册》第13卷腐蚀，1987，610~640页和《ASM手册》第20卷：材料的选用和设计，1997，389~393页。最新的统计资料和成分、性能数据则取自铜业发展协会。

第1节 引论和概述

铜及其合金构成工业用金属中的一个大族，根据产量和消耗量它仅排列于铁/钢和铝之后，位居第三。铜及其合金得以广泛应用是因为其优异的电导率和热导率、突出的耐腐蚀性、易于制造、还有良好的强度和耐疲劳性能。铜为设计者提供中等水平的密度($8.94g/cm^3$)、弹性模量($115GPa$或17×10^6psi)和熔点温度(1083℃或1981℉)。它通过形成许多有用的合金来在很大范围里提供各种不同的工程性能组合，并且能在锻压、铸造和粉末冶金(P/M)的产品形式下使用。锻压产品包括线材、板带产品(厚板、薄板、带材和箔材)、管材、圆棒、棒材、挤制品(型材)和锻件。铸件可以通过不同的方法包括砂型铸造(最为普通的铸造方法)、连铸、离心铸造、压铸、熔模铸造、石膏和金属模等铸造法进行生产。用P/M方法制造一种独特的零件如自润滑轴承和过滤元件。用P/M方法还可以制造结构零件，包括高强度氧化物弥散强化(ODS)铜合金。

铜和铜合金的特性

性能特征

传导率。工业用纯铜的电导率，~101%国际退火铜标准(IACS)(工程上，把退火纯铜的导电性规定为100%，其他材料与它对比进行标定，称为IACS值(国际退火铜标准值)——译者注)，仅次于工业纯银(~103%IACS)，居第二位。标准工业用铜现在可以达到较高的纯度，所以其电导率高于以在1913年用20℃(70℉)温度所能达到的电阻值定为100% IACS刻度时的电导率。铜的热导率也很高，391W/(m·K)[226Btu/(ft·h·℉)]，并通过Wiedemann-Franz关系与电导率相关。

就像其他金属体系，铜也要通过加入合金来提高其强度，而它们的塑性或加工性能并未因此有太多的降低。然而应当认识到合金元素的加入会降低电导率和热导率，其降低程度则取决所加入的合金元素，浓度如它们在显微组织中的相(固溶体或弥散相)。合金及其状态的选择最常取决于强度和传导率之间的权衡(见图3.2-1)。通过合金化还会将其从红棕色变成黄色(如在黄铜中加入的锌)和金属白色或“银”色(如美国铜镍钱币里加入的镍)。

耐腐蚀性。铜也是一种惰性金属，但又不像金或其他惰性金属，它会受普通试剂和环境的侵蚀。在大部分的腐蚀条件下，纯铜具有很好的耐腐蚀性。然而一些铜合金在某些介质中，因为氢脆或应力腐蚀开裂(SCC)而使其应用受到限制。

当韧铜(火精铜)即含有氧化亚铜的合金被暴露于还原性气氛中的时候可以观察到氢脆。大部分的铜

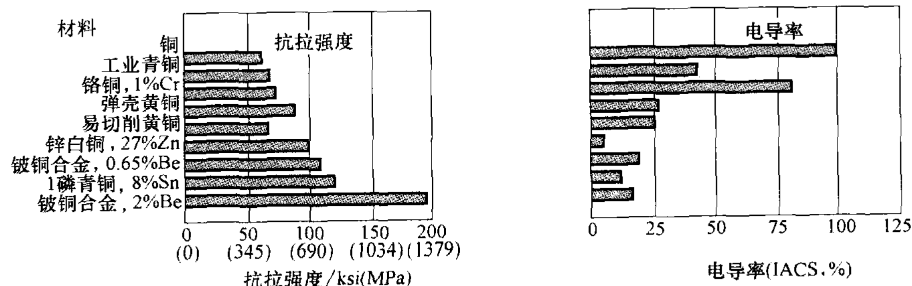


图3.2-1 铜及其合金的强度和电导率之间的关系

合金经脱氧还原后就不再会遭受氢脆。

应力腐蚀开裂最常见诸于暴露于氨或胺中的黄铜。含超过15%Zn的黄铜对此最为敏感。不含有锌或含锌量很低的铜及其大部分的铜合金一般对SCC都不敏感。因为SCC的发生同时要求拉应力和一种特定化学物质的存在，故无论将应力还是该化学物质去除都能防止开裂的发生。成形加工后的退火或消除应力都因降低残余应力而使SCC减缓。只有在使用过程中，零件不会再被弯曲或受应变，这种消除应力就足以有效，若再受那样的变形就会重新引起应力并且使零件对SCC重新敏感。

脱合金作用是影响含锌铜合金的另一种腐蚀形式。在脱合金作用过程中，较为活跃的金属有选择地从合金中失去，留下的则是较为贵重金属的一种弱化沉积。

含量超过15%Zn的铜-锌合金对脱合金作用尤为敏感，称之为脱锌过程。在黄铜的脱锌过程中，锌的有选择性缺失会留下相对疏松和脆弱的铜和氧化铜层。类似性质的腐蚀在其初始腐蚀层下面不断地继续，完好的黄铜逐渐为多孔疏松和脆弱的铜所替代。如果没有受到遏制，脱合金作用最终将穿透金属，这不仅使其构件变弱，而且还使液体或气体透过其遗留的疏松基体而发生泄漏。

有关铜的耐腐蚀性的更详细的阐述可参阅本章中第7节的有关内容。

工艺特征

变形加工性。铜和铜合金很容易浇铸成锭块(纯铜的扁锭，一般200mm厚和长达8.5m，或8in乘28ft)、方坯、圆棒或厚板——适合借助于所有的标准轧制、拉制、挤压、锻造、切削加工和连接等方法，在后续的热或冷变形加工成为厚板、薄板、圆棒、线材或管材。铜和铜合金的管材都能用穿轧和管材拉制的标准方法，或带材的连续感应焊接进行制造。铜可以在750～875℃(1400～1600℉)的温度范围里进行热变形加工，冷变形加工的工序间温度范围为375～650℃(700～1200℉)的退火，然后通常在200～350℃(390～660℉)之间的温度里进行应力消除。铜及其合金的优异制造特性得益于面心立方晶体结构和可能的十二种位错滑移系统。铜及其合金的许多应用都是由于材料具有加工硬化的优点，即通过在最终成形工序的冷变形加工中获得所需要的强度/塑性，以此让其直接使用或者将其用于冲制零件的后续成形。铜的易变形加工性可达到95%以上的截面积压缩。在两次软化退火之间的冷变形量通常最高限制在90%，以防止产生过度的晶体织构，尤其在轧制薄板和带材时。

虽然铜遵守Hall-Petch relationship关系且晶粒大小易于受工艺参数的控制，但加工硬化是用于纯铜仅有的一种强化机制。加工硬化无论是用于如在轧制带材和拉制线材时的加工产品的形状和厚度，还是用于如在加工如电气接插件时的成品零件的成形，所采用的加工硬化程度都取决于其用途所要求的塑性。经加工的铜可以通过低至250℃(480℉)温度的退火进行再结晶，其效果取决于之前冷变形加工的程度和保温的时间。尽管这对于加工是有利的，但也意味着在长时间地保持较高温度时防止材料软化将成为必须要考虑的问题，尤其在电工或电子的用途中，电阻发热(I^2R)是一个不可忽视的因素。

可焊接性。铜及其合金最常用的焊接方法是气体保护钨极电弧焊(GTAW)，特别适用于细薄的截面，因为高热量的局部输入对于高导热材料来说是很重要的。对于较厚的截面多采用气体保护金属极电弧焊(GMAW)。不同的合金有的不同可焊接性，是由不同原因造成的，包括加铅(易切削)合金容易发生的热裂和在含氧化铜合金上产生的不良焊缝。锡和锌都会降低铜合金的焊接性能。合金中的残留磷有利于可焊接性，因为它能与吸附氧结合在一起，以此避免在焊缝里生成氧化铜。电阻焊也得到了广泛应用，特别用于低热导率的合金上。大部分的铜合金都能满意地进行硬钎焊。含氧铜会产生气泡和脆裂，尤其是在氧乙炔焊接时。

表面粗糙度。对于装饰性零件，不难借助标准合金加工得到特定的颜色。铜合金可以通过打磨和抛光达到任何要求的纹路和光泽。它们可以进行电镀、用有机物质涂层或化学着色，进一步达到各种可能的光洁度。

铜工业

广义地说，美国的铜工业由两部分组成：铜采冶生产商(采矿、熔炼和精炼公司)和铜材制造商(线材轧制、黄铜生产、铸造和粉末工厂)。铜采冶生产商的终端产品几乎全部卖给铜材制造商，其中最重要的是精炼阴极铜和盘条。而铜材制造商的终端产品一般称为轧制品和铸造制品，包括线材和电缆、薄板、带材、厚板、圆棒、棒材、机制线材、管材、锻件、挤制件、铸件和P/M型材。这些产品销售给广大不同工业用户。某些轧制产品——主要为线材、电缆及大部分的管制品——无需进一步的金属压力加工而直接使用。另一方面，大多数的平轧产品、圆棒、棒材、机制线材、锻件和铸件还要经过多种金属压力加工、切削、精加工和/或装配工序才能成为最终产品。

铜采冶生产商。图3.2-2是一张简化的铜业生产流程图。左上方的方框代表采矿公司，它们多半从露天矿中摒弃了大量的低品级材料，将铜从地壳里提取。提取1t的铜矿石大约需要剔除2t的废岩石（废岩石与矿石之比有时高达5:1）。而矿石本身平均仅含有0.7% Cu。

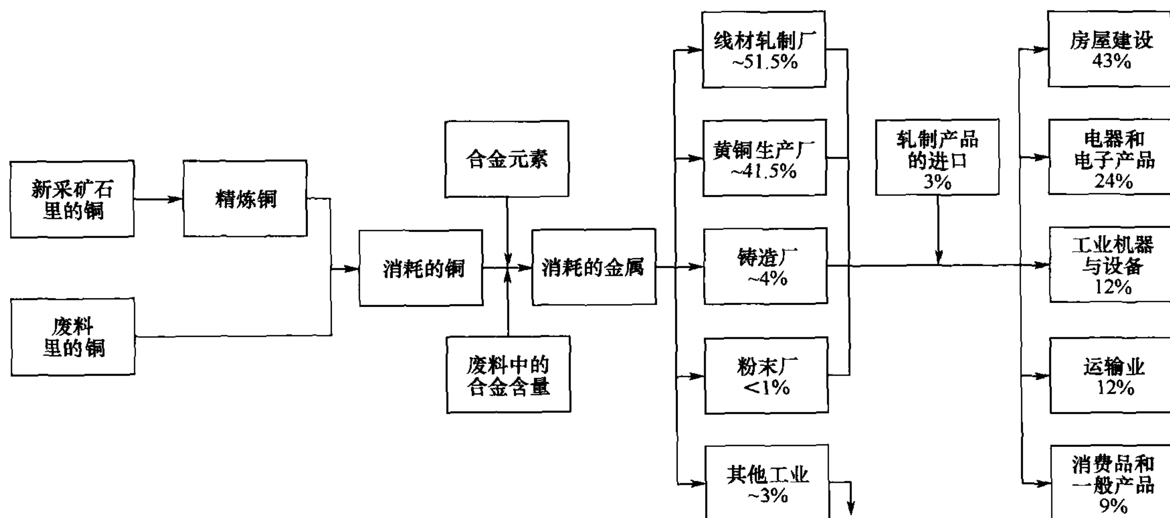


图3.2-2　美国1996年铜的供应和消耗。详见原文。源自铜业发展协会

一般都要对铜矿石进行粉碎、磨细和富选，通常通过浮选获得含~25% Cu的有用矿石。然后将富集矿石还原成金属状态，最常用的是火法熔炼工艺。按传统方法用初级熔炼反应炉（如反射炉）对经过富集的矿石进行熔炼，生产得到含量达60% Cu的硫化铜-硫化铁的铜锍。反射炉技术很快为富氧/闪速的熔炼技术所替代，后者大量减少所产生的废气。利用排出的这些废气中所含的二氧化硫可以制造硫酸，这也是从铜熔炼中获得的重要副产品。铜锍在转炉里吹炼，经氧化使硫化铁转变成为氧化铁并将其分离到炉渣中，而硫化铜被还原成至少含有98.5% Cu的粗铜。目前的技术已将转炉工序与前面的熔炼工序结合在一起。于是，粗铜经过火法精炼去除大部分的氧及其他杂质，得到纯度至少为99.5%的产品并将其铸成阳极。最后大部分的阳极铜再进行电解精炼，通常可达到的纯度至少为99.95%。

所得到的阴极板就是铜采冶生产商公司的正规终端产品，并且是商业上的通用商品。近年来，许多生产商都安置了连铸圆棒轧机，以便将阴极铜直接生产成圆棒线材（一般的直径8mm或5/16in），这是一种进入线材轧机的原料。也有一些主要的生产商将阴极板变为铜锭或扁坯以供应黄铜轧制厂。

作为一种代替火法冶金的湿法冶金工艺正在变得日益重要，特别适用于如氧化物、硅酸盐和碳酸盐的非硫化物矿石。在这种工艺过程中，弱酸从矿石或成堆的废弃材料中渗滤而出。再从浸滤液中提炼和回收得到铜，最常用的是溶剂萃取法，由此产生一种适合电解沉积的电解液。铜在电解沉积中的电解萃取与铜作为阳极进行电解精炼非常相似。利用电解沉积萃取铜的质量与利用电解精炼得到的铜是一样的。

图3.2-2左下方的方框代表由废料提供的铜源部分。近年来，美国消耗的铜中一半以上来自于废料的回收，在过去的差不多三十年里，这个百分比不断增长。在这种废料中的大约55%是新废料如从加工螺杆时车削下来的切屑。与之对应的则是旧废料如废旧电缆或汽车散热器。特别在工厂或公司内部的废料回用（可以此规避废料的产生）还不包括在上述统计内。在美国大约1/3的回收废料被送入熔炼或精炼的流程里，并很快融成一体。其余部分则直接由以下单位耗用，如：黄铜轧制厂、锭块制造厂，其主要任务是将废料加工成合金锭块以供铸造厂使用，铸造厂自身，粉末冶金厂及其他如化学、铝和钢铁工业。

图3.2-2中的"消耗的铜"，代表精炼的铜加上由制造厂直接耗用的废料中所含的铜两者总吨数。再加上在生产铜合金所使用的各种合金元素和直接耗用的废料中所含的合金含量，便得到由铜制造商和其他工业的金属总消耗量。

铜材制造商。在美国有四种类型制造商对于铜的耗用量构成每年总消耗量的~97%（包括合金金属）（见图3.2-2）。而其他工业如钢铁、铝和化学生产商消耗剩下的3%。

在近30年里，由盘条轧制厂耗用的金属份额急剧

增加，直到现在(1996年)的~51.5%，而由黄铜生产厂耗用的量下降到41.5%。铸造厂的轧件制品占大约4%，而粉末厂消耗的占美国所供应铜的则不到1%。

线材轧制产品最终作为导电体使用。这些轧制厂的冷拉材料(经必要的退火)从盘条开始通过一系列的拉丝模而达到最后的尺寸。多根铜丝可以绞合在一起，通常在组合成电缆前还要进行绝缘。

黄铜生产厂将原料进行熔炼和合金化后，制成带材、薄板、厚板、管材、圆棒、棒材、机制线材和挤制件。黄铜生产厂所消耗的铜中只有不到一半是精炼铜，其余用的是废料。像热轧、冷轧、挤制和拉制的这些制造工艺都是用于将熔化和浇铸的原料加工成轧制产品。

美国黄铜生产厂产量中的大约45%为非合金化铜和高铜合金，产品形式主要有管路器材和空调管、汇流板和其他大厚度的载流平板产品、屋面薄板。铜合金占据了其余的55%。具有突出的切削性能和耐腐蚀性的易切削黄铜圆棒和具有高强度、高耐腐蚀性、优异成形性及良好电工性能的黄铜带材，占有美国黄铜生产厂铜合金总产量的80%。其他具有主要商业价值的合金种类包括以其优异冷成形性能和强度著称的锡青铜(磷青铜)，以突出的耐腐蚀性的闻名的锡黄铜，具有强度、特别能耐海水腐蚀的铜-镍合金，兼具银的外观、良好成形性及耐腐蚀性的锌白铜，硬化后具有突出强度的铍-铜，以及具有高强度且良好的耐氧化、化学侵蚀和磨料磨损的铝青铜。

铸造厂使用预合金锭块、废料和原生金属作为其原材料。它们的主要产品就是用于许多不同工业品和消费品的并具有一定形状的铸件，其中最重要的是管路器材和工业阀门。离心铸造和连铸造产品得到的主要应用如轴承、缸体和其他对称零件。粉末厂所生产的粉末和薄片可进一步用于制造粉末冶金零件，主要为小型烧结多孔的青铜轴承。

市场和应用。图3.2-2最右面所示的五种主要的市场类别构成了铜制造商的主要用户行业。其中主要用户行业中最大的类别就是建筑业，它要采购大量的电线、管件和建筑五金方面的零件，并且应用于电器、管道、采暖器和空调系统。第二大类别是电器和电子产品，包括用于通信、电子元件、接线装置、电机和动力设施。工业机器与设备的类别包括工业阀门和配件，工业、化学和船用的换热器，以及其他各种重型装备、越野车和机床。运输类别中最为重要的包括公路车辆、铁路设备和飞机零件，汽车散热器和配线线束。最后的类别为消费品和常规产品，包括电器用具、紧固件、武器、造币和首饰。

在上述市场的五个应用领域中，铜及其合金发挥着五种主要功能：电导率、耐腐蚀性、热传导、结构能力和美观。根据这些主要功能所作的1996年消费研究，其分布如下：

功　能	消　费	
	$\times 10^6$lb	%
电学性能	4401	58
耐腐蚀性	1650	21.7
热传导	947	12.5
结构功能	486	6.4
美观	107	1.4
合计	7591	100

引自铜业发展协会。

表3.2-1所列为美国最大的铜及其合金市场的较为详细的资料。

表3.2-1　1996年美国主要铜市场

应　用	消　费	
	$\times 10^6$lb	%
建筑用线材	1215	16
管道与采暖	1147	15.1
空调与商用冰箱	671	8.8
动力设施	647	8.5
通信	544	7.2
汽车(电器)	511	6.7
工厂内设备	500	6.6
电子	409	5.4
汽车(非电器)	276	3.6
工业阀门和配件	239	3.2
灯光与接线设备	231	3.1
所有其他	1201	15.8
合计	7591	100

引自铜业发展协会。

合金及状态的代号系统

合金代号。在北美所采用的铜合金代号是属于统一编号系统(UNS)的一部分。按照UNS系统，铜合金的识别由字母“C”（表示铜)后面跟随五位数码构成。五位数码源自但代替了由铜业发展协会(CDA)制订的老三位数码系统。铜合金的UNS编号就是CDA数码的两位数的简单延伸。例如，铅黄铜

(85Cu-5Sn-5Pb-5Zn，或 85-5-5-5)，当知道其 CDA 合金号为 No. 836 时，按 UNS 就成为 C83600。

表 3.2-2 归纳了标准 UNS 的代号系统。如表所列，锻压合金的 UNS 数码从 C10000 到 C79999，铸造合金则从 C80000 到 C99999。

状态代号。铜合金也要用其状态进行表述，它们是定义冶金学工况、热处理和/或铸造方法的代号。锻压铜及其合金的状态代号就是按照由轧制或拉制形成的冷压缩量所作的传统规定。这种方法将名义状态代号用勃郎·夏普(B&S)线规数字表示对轧制薄板和拉制线材的压缩量。用这种系统表述可热处理合金和像圆棒、管材、挤制件和铸件的一些产品形式并不容易。为了弥补这种情况，又制定了 ASTM B601《锻压和铸造铜及其合金状态代号的实用标准》。该标准规定了字母、数字的混合编码，用于命名每一种以标准方式表示的状态代号(表 3.2-3)。

表 3.2-2 铜合金的通用分类

通常名称	UNS 编号	成分	通常名称	UNS 编号	成分
锻压合金			**铸造合金**		
铜	C10100 ~ C15760	>99% Cu	铜	C80100 ~ C81100	>99% Cu
高-铜合金	C16200 ~ C19600	>96% Cu	高-铜合金	C81300 ~ C82800	>94% Cu
黄铜	C20500 ~ C28580	Cu-Zn	红铜和含铅红黄铜	C83300 ~ C85800	Cu-Zn-Sn-Pb(75 ~ 89% Cu)
铅黄铜	C31200 ~ C38590	Cu-Zn-Pb	黄铜和含铅黄铜	C85200 ~ C85800	Cu-Zn-Sn-Pb(57 ~ 74% Cu)
锡黄铜	C40400 ~ C49080	Cu-Zn-Sn-Pb	锰青铜和含铅锰青铜	C86100 ~ C86800	Cu-Zn-Mn-Fe-Pb
磷青铜	C50100 ~ C52400	Cu-Sn-P	硅青铜和硅黄铜	C87300 ~ C87900	Cu-Zn-Si
铅磷青铜	C53200 ~ C54800	Cu-Sn-Pb-P	锡青铜和含铅锡青铜	C90200 ~ C94500	Cu-Sn-Zn-Pb
铜-磷和铜-银-磷合金	C55180 ~ C55284	Cu-P-Ag	镍-锡青铜	C94700 ~ C94900	Cu-Ni-Sn-Zn-Pb
铝青铜	C60600 ~ C64400	Cu-Al-Ni-Fe-Si-Sn	铝青铜	C95200 ~ C95810	Cu-Al-Fe-Ni
硅青铜	C64700 ~ C66100	Cu-Si-Sn	铜-镍	C96200 ~ C96800	Cu-Ni-Fe
其他铜-锌合金	C66400 ~ C69900	—	锌白铜	C97300 ~ C97800	Cu-Ni-Zn-Pb-Sn
铜-镍	C70000 ~ C79900	Cu-Ni-Fe	铅铜	C98200 ~ C98800	Cu-Pb
锌白铜	C73200 ~ C79900	Cu-Ni-Zn	特种合金	C99300 ~ C99750	—

表 3.2-3 铜及其合金的 ASTM B601 状态代号

状态代号	状态名称或材料的工况	状态代号	状态名称或材料的工况
冷变形加工状态①		**冷变形加工状态**②	
H00	⅛硬度	H50	挤制和拉制
H01	¼硬度	H52	穿孔和拉制
H02	½硬度	H55	轻拉和轻冷轧
H03	¾硬度	H58	一般用途的拉制
H04	全硬度	H60	冷镦头、成形
H06	超硬度	H63	铆钉
H08	弹性	H64	螺钉
H10	超弹性	H66	螺栓
H12	特种弹性	H70	弯曲
H13	极强弹性	H80	硬拉
H14	超强弹性	H85	中-硬-拉电线

（续）

状态代号	状态名称或材料的工况
冷变形加工状态[②]	
H86	硬-拉电线
H90	用于散热片
冷变形加工并消除应力状态	
HR01	H01 并消除应力
HR02	H02 并消除应力
HR04	R04 并消除应力
HR08	H08 并消除应力
HR10	H10 并消除应力
HR20	用于散热片
HR50	拉制并消除应力
冷轧并达预定的强化状态[③]	
HT04	HT04 并按预定热处理
HT08	HT08 并按预定热处理
制造后的直接状态	
M01	砂型铸造态
M02	离心铸造态
M03	石膏铸造态
M04	压力铸造态
M05	金属型铸造态
M06	熔模铸造态
M07	连铸态
M10	热锻并空冷态
M11	锻造并淬火态
M20	热轧态
M30	热挤制态
M40	热穿孔态
M45	热穿孔并重轧态
退火状态[④]	
O10	铸造并退火（均匀化）
O11	铸造并析出热处理
O20	热锻并退火
O25	热轧并退火
O30	热挤制并退火
O31	挤制并析出热处理
O40	热穿孔并退火
O50	轻度退火
退火状态[④]	
O60	软化退火
O61	退火
O65	拉制退火
O68	深拉退火
O70	完全退火
O80	退火至1/8硬度状态
O81	退火至1/4硬度状态
O82	退火至1/2硬度状态
退火状态[⑤]	
OS005	平均晶粒度大小，0.005mm
OS010	平均晶粒度大小，0.010mm
OS015	平均晶粒度大小，0.015mm
OS025	平均晶粒度大小，0.025mm
OS035	平均晶粒度大小，0.035mm
OS050	平均晶粒度大小，0.050mm
OS060	平均晶粒度大小，0.060mm
OS070	平均晶粒度大小，0.070mm
OS100	平均晶粒度大小，0.100mm
OS120	平均晶粒度大小，0.120mm
OS150	平均晶粒度大小，0.150mm
OS200	平均晶粒度大小，0.200mm
固溶处理	
TB00	固溶热处理状态
固溶处理并冷变形加工状态	
TD00	TB00 冷变形加工至1/8硬度
TD01	TB00 冷变形加工至1/4硬度
TD02	TB00 冷变形加工至1/2硬度
TD03	TB00 冷变形加工至3/4硬度
TD04	TB00 冷变形加工至全硬度
固溶处理并析出硬化状态	
TF00	TB00 并析出硬化
冷变形加工并析出硬化状态	
TH01	TD01 并析出硬化
TH02	TD02 并析出硬化
TH03	TD03 并析出硬化
TH04	TD04 并析出硬化

（续）

状态代号	状态名称或材料的工况
析出硬化并冷变形加工状态	
TL00	TF00 冷变形加工至1/8硬度
TL01	TF00 冷变形加工至1/4硬度
TL02	TF00 冷变形加工至1/2硬度
TL04	TF00 冷变形加工至全硬度
TL08	TF00 冷变形加工至弹性
TL10	TF00 冷变形加工至增强弹性
轧制硬化状态	
TM00	AM
TM01	1/4HM
TM02	1/2HM
TM04	HM
TM06	XHM
TM08	XHMS
淬硬状态	
TQ00	淬硬
TQ50	淬硬并回火退火
TQ55	淬硬并回火退火、冷拉并消除应力
TQ75	分级淬硬
析出硬化、冷变形加工和热应力消除状态	
TR01	TL01 并消除应力
TR02	TL02 并消除应力
TR04	TL04 并消除应力
固溶处理并调幅分解热处理状态	
TX00	调幅分解硬化
焊接管状态⑥	
WH00	焊接并拉至1/8硬度
WH01	焊接并拉至1/4硬度
WH02	焊接并拉至1/2硬度
WH03	焊接并拉至3/4硬度
WH04	焊接并拉至全硬度
WH06	焊接并拉至增强硬度
WM00	用 H00（1/8硬度）带材焊接态
WM01	用 H01（1/4硬度）带材焊接态
WM02	用 H02（1/2硬度）带材焊接态
WM03	用 H03（3/4硬度）带材焊接态
WM04	用 H04（全硬度）带材焊接态
WM06	用 H06（超硬度）带材焊接态
WM08	用 H08（弹性）带材焊接态
WM10	用 H10（超弹性）带材焊接态
WM15	WM50 并消除应力
WM20	WM00 并消除应力
WM21	WM01 并消除应力
WM22	WM02 并消除应力
WM50	用退火带材焊接态
WO50	焊接并轻度退火
WR00	WM00，拉制并消除应力
WR01	WM01，拉制并消除应力
WR02	WM02，拉制并消除应力
WR03	WM03，拉制并消除应力
WR04	WM04，拉制并消除应力
WR06	WM06，拉制并消除应力

①冷变形加工状态需根据冷轧和冷拉满足其标准要求。 ②冷变形加工状态需根据适用于特定产品的状态名称满足其标准要求。 ③通过控制冷变形加工量及其后续的热处理实现预定强化，并由此得到的状态。 ④退火满足特定的力学性能要求。 ⑤退火满足预定的名义平均晶粒大小。 ⑥通过拉制或退火而产生规定的力学性能或者通过退火得到预定名义平均晶粒大小所完成加工的管材，通常都是用相应的 H、O 或 OS 的状态代号进行标记。

国际合金代号。在国际标准化组织的范围内，通用的这种代号系统也就是在 ISO 1190 第一部分里描述的成分系统，依据的是元素的符号与合金元素含量幅值的递减顺序。例如，一种含有 60% Cu 和 2% Pb 的铅黄铜被定名为 CuZn38Pb2。因为这个系统在对复杂合金进行描述时难以应用，故欧洲标准委员会（Comité Européen de Normalisation 或 CEN）建立了一套欧洲的编号系统。CEN/TC 132 采纳六位字母、数字系统。第一个字母“C”代表铜合金。第二个字母用于表示材料的状态（即 W 表示锻压材料、C 为铸件及 M 为二元合金）。随后的三位数字用于表征材料，还有最后的第三个字母用于辨别各个铜材料组的类别，并且扩大代号系统的功能。表 3.2-4 所示是表达不同铜合金组所推荐的编号编列和由 CEN 编号系统为不

同铜合金组所配置的字母。表3.2-5对照列举了一些 ISO和CEN的代号。

表3.2-4 铜及其合金的CEN欧洲编号系统，所示为不同铜合金组所选用的编号范围和为不同材料组所配置的字母

材料组	用于3、4、5位置上的编号范围	末位字母代表的材料组	CEN推荐的材料配置的编号编列
铜	001～999	A	001～049A
	001～999	B	050～099B
其他铜合金	001～999	C	100～149C
	001～999	D	150～199D
	001～999	E	200～249E
	001～999	F	250～299F
铜-铝合金	001～999	G	300～349G
铜-镍合金	001～999	H	350～399H
铜-镍-锌合金	001～999	J	400～449J
铜-锡合金	001～999	K	459～499K
铜-锌合金，二元	001～999	L	500～549L
	001～999	M	550～599M
铜-锌-铅合金	001～999	N	600～649N
	001～999	P	650～699P
铜-锌合金，复杂	001～999	R	700～749R
			750～799S
CEN/TC 133未标准化的铜材料	800～999	A～S①	800～999①

① 字母与材料组相适应。

表3.2-5 所选列的铜及其合金的ISO和CEN的编号对照

材料	材料代号		材料	材料代号	
	ISO符号	CEN编号		ISO符号	CEN编号
铜	Cu-ETP	CW004A	其他锻压合金	CuNi30Mn1Fe	CW354H
	Cu-OF	CW008A	铸造合金	CuZn33Pb2-GB	CB750S
锻压黄铜	CuZn37	CW508L		CuZn33Pb2-GS	CC750S
	CuZn39Pb3	CW614N		CuSn12-GB	CB483K
	CuZn20Al2As	CW702R		CuSn12-GS	CC483K
	CuZn40Mn1Pb1AlFeSn	CW721R	二元合金	CuAl50(A)-M	CM344G
其他锻压合金	CuNi2Si	CW111C		CuCr10-M	CM204E
	CuAl10Fe1	CW305G		CuS20-M	CM220E

锻压铜合金

在铜中加入合金元素的目的是为了使强度、塑性(成形性)和热稳定性得以优化，同时在制造性能、电/热传导性和耐腐蚀性方面不发生过多的损失。铜合金具有优异的热态和冷态下的塑性，但它们通常达不到与其非合金化母金属相同程度的塑性。即使是一些含有大量能促使快速加工硬化的固溶硬化元素——锌、铝、锌和硅的合金，仍不难在为进一步加工而要求进行的软化退火之前对其实施变形量在50%以上

的冷变形加工。为了控制晶粒大小的和晶体学织构，必须对冷变形加工的程度和退火参数进行权衡。通过控制这两种参数可制取有精确厚度的退火带材产品，它们具有铜、黄铜和其他铜合金制品以及圆柱形管制品一般在进行复杂成形和深拉的工业生产中才需要的成形性。

表3.2-6列出了锻压铜及其合金的化学成分。它们的典型力学性能则列在表3.2-7中。

表3.2-6　锻压铜及其合金的化学成分

铜

铜编号	代号	描　述	化学成分(质量分数,%)							
			Cu 最低(包含Ag在内)(%)	Ag 最低		As	Sb	P	Te	其他注名元素
				%	金衡，盎司					
C10100	OPE	无氧-电子学用	99.99②	—	—	0.0005	0.004	0.0003	0.0002	③
C10200①	OF	无氧	99.95	—	—	—	—	—	—	0.0010O
C10300	OFXLP	—	99.95④	—	—	—	—	0.001～0.005	—	—
C10400①	OFS	无氧含Ag	99.95	0.027	8	—	—	—	—	—
C10500①	OFS	无氧含Ag	99.95	0.034	10	—	—	—	—	—
C10700	OFS	无氧含Ag	99.95	0.085	25	—	—	—	—	—
C10800	OFLP	—	99.95④	—	—	—	—	0.005～0.012	—	—
C10920	—	—	99.90	—	—	—	—	—	—	0.02O
C10930	—	—	99.90	0.044	13	—	—	—	—	0.02O
C10940	—	—	99.90	0.085	25	—	—	—	—	0.02O
C11000①	ETP	电解韧(火精)铜	99.90	—	—	—	—	—	—	⑤
C11010①	RHC	重熔高传导性	99.90	—	—	—	—	—	—	⑤
C11020①	FRHC	火法精炼高传导性	99.90	—	—	—	—	—	—	⑤
C11030①	CRTP	化学精炼高传导性	99.90	—	—	—	—	—	—	⑤
C11040①	—	—	99.90	—	—	0.0005	0.0004	—	0.0002	⑥
C11100①	—	电解韧(火精)铜，耐退火	99.90	—	—	—	—	—	—	⑦
C11300①	STP	韧(火精)铜含Ag	99.90	0.027	8	—	—	—	—	⑤
C11400①	STP	韧(火精)铜含Ag	99.90	0.034	10	—	—	—	—	⑤
C11500①	STP	韧(火精)铜含Ag	99.90	0.054	16	—	—	—	—	⑤
C11600①	STP	韧(火精)铜含Ag	99.90	0.085	25	—	—	—	—	⑤

（续）

铜										
铜编号	代号	描　述	化学成分（质量分数，%）							
			Cu　最低（包含Ag在内）（%）	Ag　最低		As	Sb	P	Te	其他注名元素
				%	金衡，盎司					
C11700	—	—	99.9[8]	—	—	—	—	0.04	—	0.004～0.02B
C12000	DLP	脱氧磷，低残留磷	99.90	—	—	—	—	0.004～0.012	—	—
C12100	—	—	99.90	0.014	4	—	—	0.005～0.012	—	—
C12200[9]	DHP	脱氧磷，高残留磷	—	99.9	—	—	—	—	0.015～0.040	—
C12210	—	—	99.90	—	—	—		0.015～0.025	—	
C12220	—	—	99.9	—	—	—	—	0.040～0.065	—	
C12300	—	—	99.90	—	—	—	—	0.015～0.040	—	
C12900	FRSTP	火法精炼韧铜含Ag	99.88	0.054	16	0.012	0.003	—	0.025[10]	0.050Ni
										0.003Bi
										0.004Pb
C14180	—	—	99.90	—	—	—	—	0.075	—	0.02Pb
										0.01Al
C14181	—	—	99.90	—	—	—	—	0.002	—	0.002Cd
										0.005C
										0.002Pb
										0.002Zn
C14200	DPA	脱氧磷，含砷	99.4	—	—	0.15～50	—	0.015～0.040	—	—
C14300	—	镉铜，脱氧	99.90[11]	—	—	—	—	—	—	0.05～0.15Cd
C14410	—	—	99.90[12]	—	—	—	—	0.005～0.020	—	0.05Fe
										0.05Pb
										0.10～0.20Sn
C14415	—	—	99.96[12]	—	—	—	—	—	—	0.10～0.15Sn
C14420	—	—	99.90[13]	—	—	—	—	—	0.005～0.05	0.04～0.15Sn

（续）

铜

铜编号	代号	描述	化学成分(质量分数,%) Cu 最低(包含Ag在内)(%)	Ag 最低 %	Ag 最低 金衡，盎司	As	Sb	P	Te	其他注名元素
C14500[14]	—	含碲	99.90[13]	—	—	—	—	0.004~0.012	0.40~0.7	—
C14510	—	含碲	99.90[13]	—	—	—	—	0.010~0.030	0.30~0.7	0.05Pb
C14520	DPTE	脱氧磷，含碲	99.40[13]	—	—	—	—	0.004~0.020	0.40~0.7	—
C14530	—	—	99.90[10,12]	—	—	—	—	0.001~0.010	0.003~0.023[10]	0.003~0.023Sn
C14700	—	含硫	99.90[14]	—	—	—	—	0.002~0.005	—	0.20~0.50S
C15000	—	锆铜	99.80	—	—	—	—	—	—	0.10~0.20Zr
C15100	—	—	99.82	—	—	—	—	—	—	0.005Al
										0.005Mn
										0.05~0.15Zr
C15500	—	—	99.75	0.027~0.10	8~30	—	—	0.040~0.080	—	0.08~0.13Mg

铜编号	化学成分(质量分数,%) Cu(包括Ag) 最低	Al[15]	Fe	Pb	O[15]
C15715	99.62	0.13~0.17	0.01	0.01	0.12~0.19
C15720	99.52	0.18~0.22	0.01	0.01	0.16~0.24
C15725	99.43	0.23~0.27	0.01	0.01	0.20~0.28
C15760	98.77	0.58~0.62	0.01	0.01	0.52~0.59

合金 C16200~C19150(高铜合金)

铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%) Cu(包括Ag)	Fe	So	Ni	Co	Cr	Si	Be	Ph	其他注名元素
C16200	镉铜	余量[16]	0.02	—	—	—	—	—	—	—	0.7~1.2Cd
C16500	—	余量[16]	0.02	0.50~0.7	—	—	—	—	—	—	0.6~1.0Cd
C17000	铍铜	余量[16]	[17]	—	[17]	[17]	—	0.20	1.60~1.79	—	0.20Al
C17200	铍铜	余量[16]	[17]	—	[17]	[17]	—	0.20	1.80~2.00	0.02	0.20Al
C17300	—	余量[16]	[17]	—	[17]	[17]	—	0.20	1.80~2.00	0.20~0.6	0.20Al
C17410	—	余量[16]	0.20	—	—	0.35~0.6	—	0.20	0.15~0.50	—	0.20Al

（续）

合金C16200～C19150（高铜合金）

铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数，%）									
		Cu（包括Ag）	Fe	So	Ni	Co	Cr	Si	Be	Ph	其他注名元素
C17500	铍铜	余量[16]	0.10	—	—	2.4～2.7	—	0.20	0.40～0.70	—	0.20Al
C17510	—	余量[16]	0.10	—	1.4～2.2	0.30	—	0.20	0.20～0.6	—	0.20Al
C18000	—	余量[16]	0.15	—	1.8～3.0[18]	—	0.10～0.8	0.40～0.8	—	—	—
C18030	—	余量[19]	—	0.08～0.12	—	—	0.10～0.20	—	—	—	0.005～0.015P
C18040	—	余量[14]	—	0.20～0.30	—	—	0.25～0.35	—	—	—	0.005～0.015P
											0.05～0.15Zn
C18050	—	余量[20]	—	—	—	—	0.05～0.15	—	—	—	0.005～0.015Te
C18070	—	99.0[20]	—	—	—	—	0.15～0.40	0.02～0.07	—	—	0.01～0.40Ti
C18090	—	96.0最小[29]	—	0.50～1.2	0.30～1.2	—	0.20～1.0	—	—	—	0.15～8Ti
C18100	—	98.7最小[16]	—	—	—	—	0.40～1.2	—	—	—	0.03～0.06Mg
											0.08～0.20Zr
C18135	—	余量[16]	—	—	—	—	0.20～0.6	—	—	—	0.20～0.6Cd
C18140	—	余量[16]	—	—	—	—	0.15～0.45	0.005～0.05	—	—	0.05～0.25Zr
C18150	—	余量[21]	—	—	—	—	0.50～1.5	—	—	—	0.05～0.25Zr
C18200	铬铜	余量[16]	0.10	—	—	—	0.06～1.2	0.10	—	0.05	—
C18400	铬铜	余量[16]	0.15	—	—	—	0.40～1.2	0.10	—	—	0.005As
											0.005Ca
											0.05Li
											0.05P
											0.7Zn
C18700	—	余量[16]	—	—	—	—	—	—	—	0.8～1.5	—
C18900	—	余量[16]	—	0.6～0.9	—	—	—	0.15～0.40	—	0.02	0.05P
											0.01Al
											0.10～0.30Mn
											0.10Zn
C18980	—	98.0[16]	—	1.0	—	—	—	0.50	—	0.02	0.50Mn
											0.15P
C18990	—	余量[19]	—	1.8～2.2	—	—	0.10～0.20	—	—	—	0.005～0.015P
C19000	—	余量[16]	0.10	—	0.9～1.3	—	—	—	—	0.05	0.8Zn
											0.015～0.35P
C19010	—	余量[16]	—	—	0.8～1.8	—	—	0.15～0.35	—	—	0.01～0.05P
C19015	—	余量[20]	—	—	0.50～2.4	—	—	0.10～0.40	—	—	0.02～0.20P

（续）

铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数,%） Cu（包括Ag）	Fe	So	Ni	Co	Cr	Si	Be	Ph	其他注名元素
合金 C16200 ~ C19150（高铜合金）											
											0.02 ~ 0.15Mg
C19020	—	余量[20]	—	0.30 ~ 0.9	0.50 ~ 3.0	—	—	—	—	—	0.01 ~ 0.20P
											0.35Mn + Si
C19030	—	余量[21]	0.10	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	—	—	—	—	0.02	0.01 ~ 0.03P
C19100	—	余量[16]	0.20	—	0.9 ~ 1.3	—	—	—	—	0.10	0.50Zn
											0.35 ~ 0.6Te
											0.15 ~ 0.35P
C19150	—	余量[16]	0.05	0.05	0.8 ~ 1.2	—	—	—	—	0.50 ~ 1.0	0.15 ~ 0.35P

合金 C19200 ~ C19900（高铜合金）

铜合金编号	化学成分（质量分数,%） Cu	Fe	Sn	Zn	Al	Pb	P	其他注名元素
C19200	98.5 最小[20]	0.8 ~ 1.2	—	0.20	—	—	0.01 ~ 0.04	
C19210	余量[20]	0.05 ~ 0.15	—	—	—	—	0.025 ~ 0.040	
C19220	余量[20]	0.10 ~ 0.30	0.05 ~ 0.10	—	—	—	0.03 ~ 0.07	0.005 ~ 0.015B
								0.10 ~ 0.25Ni
C19260	98.5 最小[19]	0.40 ~ 0.8	—	—	—	—	—	0.20 ~ 0.40Ti
								0.20 ~ 0.15Mg
C19280	余量[20]	0.50 ~ 1.5	0.30 ~ 0.7	0.30 ~ 0.7	—	—	0.005 ~ 0.015	
C19400	97.0 最小	2.1 ~ 2.6	—	0.05 ~ 0.20	—	0.03	0.015 ~ 0.15	
C19410	余量[20]	1.8 ~ 2.3	0.6 ~ 0.9	0.10 ~ 0.20	—	—	0.015 ~ 0.050	
C19450	余量[20]	1.5 ~ 3.0	0.8 ~ 2.5	—	—	—	0.005 ~ 0.05	
C19500	96.0 最小[20]	1.0 ~ 2.0	0.10 ~ 1.0	0.20 ~ 0.02	0.02	0.02	0.01 ~ 0.35	0.30 ~ 1.3Co
C19520	96.6 最小[20]	0.50 ~ 1.5	—	—	—	0.01 ~ 3.5	—	
C19700	余量[20]	0.30 ~ 1.2	0.20	0.20	—	0.05	0.10 ~ 0.40	0.01 ~ 0.20Mg
								0.05Ni
								0.05Co
								0.05Mn
C19750	余量[20]	0.35 ~ 1.2	0.05 ~ 0.40	0.20	—	0.05	0.10 ~ 0.40	0.01 ~ 0.20Mg
								0.05Ni
								0.05Co
								0.05Mn
C19900	余量[16]	—	—	—	—	—	—	2.9 ~ 3.4Ti

（续）

铜锌合金(黄铜)						
铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%)				
		Cu	Pb	Fe	Zn	其他注名元素
C21000	镀饰，95%	94.0~96.0[20]	0.03	0.05	余量	—
C22000	商业青铜，90%	89.0~91.0[20]	0.05	0.05	余量	—
C22600	首饰青铜，87 %	86.0~89.0[20]	0.05	0.05	余量	—
C23000	红铜，85%	84.0~86.0[20]	0.05	0.05	余量	—
C23030	—	83.5~85.5[20]	0.05	0.05	余量	0.20~0.40Si
C23400	—	81.0~84.0[20]	0.05	0.05	余量	—
C24000	低锌黄铜，80%	78.5~81.5[20]	0.05	0.05	余量	—
C24080	—	78.0~82.0[20]	0.20	—	余量	0.10Al
C26000	弹，70%	68.5~71.5[21]	0.07	0.05	余量	—
C26130	—	68.5~71.5[21]	0.05	0.05	余量	0.02~0.08As
C26200	—	67.0~70J[21]	0.07	0.05	余量	—
C26800	黄铜，66%	64.0~68.5[21]	0.15	0.05	余量	—
C27000	黄铜，65%	63.0~68.5[21]	0.10	0.07	余量	—
C27200	—	62.0~65.0[21]	0.07	0.07	余量	—
C27400	黄铜，63%	61.0~64.0[21]	0.10	0.05	余量	—
C28000	孟兹合金(四-六黄铜)，60%	59.0~63.0[21]	0.30	0.07	余量	—

铜-锌-铅合金(含铅黄铜)						
铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%)				
		Cu	Pb	Fe	Zn	其他注名元素
C31200	—	87.5~90.5[22]	0.7~1.2	0.10	余量	0.25Ni
C31400	含铅商业青铜	87.5~90.5[22]	1.3~2.5	0.10	余量	0.7Ni
C31600	含铅商业青铜(含镍)	87.5~90.5[22]	1.3~2.5	0.10	余量	0.7~1.2Ni，0.4~0.10P
C32000	含铅红铜	83.5~86.5[22]	1.5~2.2	0.10	余量	0.25Ni
C33000	低铅黄铜(管)	65.0~68.0[22]	0.25~0.7[23]	0.07	余量	—
C33200	高铅黄铜(管)	65.0~68.0[22]	1.5~2.5	0.07	余量	—
C33500	低铅黄铜	62.0~65.0[22]	0.25~0.7	0.15[24]	余量	—
C34000	中铅黄铜，64½%	62.0~65.0[22]	0.8~1.5	0.15[24]	余量	—
C34200	高铅黄铜，64½%	62.0~65.0[22]	1.5~2.5	0.15[24]	余量	—
C34500	—	62.0~65.0[22]	1.5~2.5	0.15	余量	—
C35000	中铅黄铜，62%	60.0~63.0[22,25]	0.8~2.0	0.15[24]	余量	—
C35300	高铅黄铜，62%	60.0~63.0[16,25]	1.5~2.5	0.15[24]	余量	—
C35330	—	60.5.0[16]	1.5~3.5[26]	—	余量	0.02~0.25As
C35600	超高铅黄铜	60.0~63.0[16]	2.0~3.0	0.15[24]	余量	—
C36000	易切削黄铜	60.0~63.0[16]	2.5~3.7	0.35	余量	—
C36500	含铅孟兹合金，不防腐蚀的	58.0~61.0[22]	0.25~0.7	0.15	余量	0.25Sn

（续）

铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数,%）				
		Cu	Pb	Fe	Zn	其他注名元素
铜-锌-铅合金（含铅黄铜）						
C37000	易切削合金	59.0～62.0[22]	0.8～1.5	0.15	余量	—
C37100	—	58.0～62.0[22]	0.6～1.2	0.15	余量	—
C37700	锻造黄铜	58.0～61.0[16]	1.5～2.5	0.30	余量	—
C37710	—	56.5～60.0[16]	1.0～3.0	0.30	余量	—
C38000	低铅建筑青铜	55.0～60.0[16]	1.5～2.5	0.35	余量	0.50Al
						0.30Sn
C38500	建筑青铜	55.0～59.0[16]	2.5～3.5	0.35	余量	—

铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数,%）						
		Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	P	其他注名元素
铜-锌-锡合金（锡黄铜）								
C40400	—	余量[21]	—	—	0.35～0.7	2.0～3.0	—	—
C40500	—	94.0～96.0[21]	0.05	0.05	0.7～1.3	余量	—	—
C41000	—	91.0～93.0[21]	0.05	0.05	2.0～2.8	余量	—	—
C41100	—	89.0～92.0[21]	0.10	0.05	0.30～0.7	余量	—	—
C41300	—	89.0～93.0[21]	0.10	0.05	0.7～1.3	余量	—	—
C41500	—	89.0～93.0[21]	0.10	0.05	1.5～2.2	余量	—	—
C42000	—	88.0～91.0[21]	—	—	1.5～2.0	余量	0.25	—
C42200	—	86.0～89.0[21]	0.05	0.05	0.8～1.4	余量	0.35	—
C42500	—	87.0～90.0[21]	0.05	0.05	1.5～3.0	余量	0.35	—
C43000	—	84.0～87.0[21]	0.10	0.05	1.7～2.7	余量	—	—
C43400	—	84.0～87.0[21]	0.05	0.05	0.40～1.0	余量	—	—
C43500	—	79.0～83.0[21]	0.10	0.05	0.6～1.2	余量	—	—
C43600	—	80.0～83.0[21]	0.05	0.05	0.20～0.50	余量	—	—
C44300	海军黄铜，含砷	70.0～73.0[22]	0.07	0.06	0.8～1.2[22]	余量	—	0.02～0.06As
C44400	海军黄铜，含锑	70.0～73.0[22]	0.07	0.06	0.8～1.2[22]	余量	—	0.02～0.10Sb
C44500	海军黄铜，含磷	70.0～73.0[22]	0.07	0.06	0.8～1.2[22]	余量	0.02～0.10	—
C46200	海军黄铜，63.5%	62.0～65.0[22]	0.20	0.10	0.50～1.0	余量	—	—
C46400	海军黄铜，不防腐蚀的	59.0～62.0[22]	0.20	0.10	0.50～1.0	余量	—	—
C46500	海军黄铜，含砷	59.0～62.0[22]	0.20	0.10	0.50～1.0	余量	—	0.02～0.06As
C47000	海军黄铜焊接和硬钎焊焊条	57.0～61.0[22]	0.05	—	0.25～1.0	余量	—	0.01Al
C47940	—	63.0～66.0[22]	1.0～2.0	0.10～1.0	1.2～2.0	余量	—	0.10～0.50Ni（包括Co）
C48200	海军黄铜，中含铅量	59.0～62.0[22]	0.40～1.0	0.10	0.50～1.0	余量	—	—
C48500	海军黄铜，高含铅量	59.0～62.0[22]	1.3～2.2	0.10	0.50～1.0	余量	—	—
C48600	—	59.0～62.0[22]	1.0～2.5	—	0.8～1.5	余量	—	0.02～0.25As

（续）

铜-锡-磷合金(磷青铜)

铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%)						
		Cu[16]	Pb	Fe	Sn	Zn	P	其他注名元素
C50100	—	余量	0.05	0.05	0.50~0.8	—	0.01~0.05	—
C50200	—	余量	0.05	0.10	1.0~1.5	—	0.04	—
C50500	磷青铜，1.25%E	余量	0.05	0.10	1.0~1.7	0.30	0.03~0.35	—
C50700	—	余量	0.05	0.10	1.5~2.0	—	0.30	—
C50710	—	余量	—	—	1.7~2.3	—	0.15	0.10~0.40Ni
C50715	—	余量[28]	0.02	0.05~0.15	1.7~2.3	—	0.025~0.04	—
C50900	—	余量	0.05	0.10	2.5~3.8	0.30	0.03~0.30	—
C51000	磷青铜，5%A	余量	0.05	0.10	4.2~5.8	0.30	0.03~0.35	—
C51100	—	余量	0.05	0.10	3.5~4.9	0.30	0.03~0.35	—
C51800	磷青铜	余量	0.02	—	4.0~6.0	—	0.10~0.35	0.01Al
C51900	—	余量	0.05	0.10	5.0~7.0	0.30	0.03~0.35	—
C52100	磷青铜，8%C	余量	0.05	0.10	7.0~9.0	0.20	0.03~0.35	—
C52400	磷青铜，10%D	余量	0.05	0.10	9.0~11.0	0.20	0.03~0.35	—

铜-锡-铅磷合金(铅磷青铜)

铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%)					
		Cu[16]	Pb	Fe	Sn	Zn	P
C50100	磷青铜 B-1	余量	0.8~1.2	0.10	3.5~5.8	0.30	0.03~0.35
C50200	磷青铜 B-2	余量	3.5~4.5	0.10	3.5~4.5	1.5~4.5	0.01~0.50

铜-磷和铜-银-磷合金(硬钎焊合金)

铜合金编号	化学成分(质量分数,%)		
	Cu[28]	Ag	P
C55180	余量	—	4.8~5.2
C55181	余量	—	7.0~7.5
C55280	余量	1.8~2.2	6.8~7.2
C55281	余量	4.8~5.2	5.8~6.2
C55282	余量	4.8~5.2	6.5~7.0
C55283	余量	5.8~6.2	7.0~7.5
C55284	余量	14.5~15.5	4.8~5.2

铜铝合金(铝青铜)

铜合金编号	化学成分(质量分数,%)									
	Cu[16]（包括 Ag）	Pb	Fe	Sn	Zn	Al	Mn	Si	Ni（包括 Co）	其他注名元素
C60800	余量	0.10	0.10	—	—	5.0~0.5	—	—	—	0.02~0.35As
C61000	余量	0.02	0.50	—	0.20	6.0~8.5	—	0.10	—	—
C61300	余量[28]	0.01	2.0~3.0	0.20~0.50	0.10[30]	6.0~7.5	0.20	0.10	0.15	0.015P[30]

（续）

铜铝合金（铝青铜）

铜合金编号	化学成分（质量分数,%）									
	Cu[16]（包括 Ag）	Pb	Fe	Sn	Zn	Al	Mn	Si	Ni（包括 Co）	其他注名元素
C61400	余量	0.01	1.5~3.5	—	0.20	6.0~8.0	1.0	—	—	0.015P
C61500	余量	0.015	—	—	—	7.7~8.3	—	—	1.8~2.2	—
C61550	余量	0.05	0.20	0.05	0.8	5.5~6.5	1.0	—	1.5~2.5	0.8Zn
C61800	余量	0.02	0.50~1.5	—	0.02	8.5~11.0	—	0.10	—	—
C61900	余量	0.02	3.0~4.5	0.6	0.8	8.5~10.0	—	—	—	—
C62200	余量	0.02	3.0~4.2	—	0.02	11.0~12.0	—	0.10	—	—
C62300	余量	—	2.0~4.0	0.6	—	8.5~10.0	0.50	0.25	1.0	—
C62400	余量	—	2.0~4.5	0.20	—	10.0~11.5	0.30	0.25	—	—
C62500	余量	—	3.5~5.5	—	—	12.5~13.5	2.0	—	—	—
C62580	余量	0.02	3.0~5.0	—	0.02	12.0~13.0	—	0.04	—	—
C62581	余量	0.02	3.0~5.0	—	0.02	13.0~14.0	—	0.04	—	—
C62582	余量	0.02	3.0~5.0	—	0.02	14.0~15.0	—	0.04	—	—
C63000	余量	—	2.0~4.0	0.20	0.30	9.0~11.0	1.5	0.25	4.0~5.5	—
C63010	78.0 最小[20]	—	2.0~3.5	0.20	0.30	9.7~10.9	1.5	—	4.5~5.5	—
C63020	74.5 最小	0.03	4.0~5.5	0.25	0.30	10.0~11.0	1.5	—	4.2~6.0	0.20Co
										0.05Cr
C63200	余量	0.02	3.5~4.3[31]	—	—	8.7~9.5	1.2~2.0	0.10	4.0~4.8[31]	—
C63280	余量	0.02	3.0~5.0	—	—	8.5~9.5	0.6~3.5	—	4.0~5.5	—
C63380	余量	0.02	2.0~4.0	—	0.15	7.0~8.5	11.0~14.0	0.10	1.5~3.0	—
C63400	余量	0.05	0.15	0.20	0.50	2.6~3.2	—	0.25~0.45	0.15	0.15As
C63600	余量	0.05	0.15	0.20	0.50	3.0~4.0	—	0.7~1.3	0.15	0.15As
C63800	余量	0.05	0.20	—	0.8	2.5~3.1	0.10	1.5~2.1	0.20[32]	0.25~0.55Co
C64200	余量	0.05	0.30	0.20	0.50	6.3~7.6	0.10	1.5~2.2	0.25	0.15As
C64210	余量	0.05	0.30	0.20	0.50	6.3~7.0	0.10	1.5~2.0	0.25	0.15As
C64700	—	余量	0.10	0.10	—	0.50	—	0.4~0.8	1.6~2.2	—
C64710	—	95.0 最小	—	—	—	0.20~0.50	0.10	0.50~0.9	2.9~3.5	—
C64730	—	93.5 最小	—	—	1.0~1.5	0.20~0.50	0.10	0.50~0.9	2.9~3.5	—
C64900	—	余量	0.05	0.10	1.2~1.6	0.20	—	0.8~1.2	0.10	0.10Al
C65100	低硅青铜 B	余量	0.05	0.8	—	1.5	0.7	0.8~2.0	—	—
C65400	—	余量	0.05	—	1.2~1.9	0.50	—	2.7~3.4	—	0.01~0.12Cr
C65500	低硅青铜 A	余量	0.05	0.8	—	1.5	0.50~1.3	2.8~3.8	0.6	—
C65600	—	余量	0.02	0.50	1.5	1.5	1.5	2.8~4.0	—	0.01Al
C66100	—	余量	0.20~0.8	0.25	—	1.5	1.5	2.8~3.5	—	—

（续）

其他铜-锌合金

铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数，%）									
		Cu[16]（包括Ag）	Pb	Fe	Sn	Zn	Ni（包括Co）	Al	Mn	Si	其他注名元素
C66400	—	余量	0.015	1.3~1.7[39]	0.05	11.0~12.0	—	—	—	—	0.30~0.7Co[39]
C66410	—	余量	0.015	1.8~2.3	0.05	11.0~12.0	—	—	—	—	—
C66700	锰黄铜	68.5~71.5	0.07	0.10	—	余量	—	—	0.8~1.5	—	—
C66800	—	60.0~63.0	0.50	0.35	0.30	余量	0.25	0.25	2.0~3.5	0.50~1.5	—
C67000	锰青铜 B	63.0~68.0	0.20	2.0~4.0	0.50	余量	—	3.0~6.0	2.5~5.0	—	—
C67300	—	58.0~63.0	0.40~3.0	0.50	0.30	余量	0.25	0.25	2.0~3.5	0.50~1.5	—
C67400	—	57.0~60.0	0.50	0.35	0.30	余量	0.25	0.50~2.0	2.0~3.5	0.50~1.5	—
C67500	锰青铜 A	57.0~60.0	0.20	0.8~2.0	0.50~1.5	余量	—	0.25	0.05~0.50	—	—
C67600	—	57.0~60.0	0.50~1.0	0.40~1.3	0.50~1.5	余量	—	—	0.05~0.50	—	—
C68000	青铜，无烟（镍）	56.0~60.0	0.05	0.25~1.25	0.75~1.10	余量	0.20~0.8	0.01	0.01~0.50	0.15	—
C68100	青铜，无烟	56.0~60.0	0.05	0.25~1.25	0.75~1.10	余量	—	0.01	0.01~0.50	0.04~0.15	—
C68700	铝黄铜，砷	76.0~79.0	0.07	0.06	—	余量	—	1.8~2.5	—	—	0.02~0.06As
C68800	—	余量	0.05	0.20	—	21.3~24.1[39]	—	3.0~3.8[39]	—	—	0.25~0.55Co
C69050	—	70.0~75.0	—	—	—	余量	0.50~1.5	3.0~4.0	—	0.10~0.6	0.01~0.20Zr
C69100	—	81.0~84.0	0.05	0.25	0.10	余量	0.8~1.4	0.7~1.2	0.10 最低	0.8~1.3	—
C69400	硅红铜	80.0~83.0	0.30	0.20	—	余量	—	—	—	3.5~4.5	—
C69430	—	80.0~83.0	0.30	0.20	—	余量	—	—	—	3.5~4.5	0.03~0.06As
C69700	—	75.0~80.0	0.50~1.5	0.20	—	余量	—	—	0.40	2.5~3.5	—
C69710	—	75.0~80.0	0.50~1.5	0.20	—	余量	—	—	0.40	2.5~3.5	0.03~0.06As

（续）

铜镍合金									
铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数，%）							
		Cu（包括 Ag）	Pb	Fe	Zn	Ni（包括 Co）	Sn	Mn	其他注名元素
C70100	—	余量[16]	—	0.05	0.25	3.0～4.0	—	0.50	—
C70200	—	余量[16]	0.05	0.10	—	2.0～3.0	—	0.40	—
C70250	—	余量[16]	0.05	0.20	1.0	2.2～4.2	—	0.10	0.05～0.30Mg
									0.25～1.2Si
C70400	铜-镍，5%	剩余[16]	0.05	1.3～1.7	1.0	4.8～6.2	—	0.30～0.8	—
C70500	铜-镍，7%	余量[16]	0.05	0.10	0.20	5.8～7.8	—	0.15	—
C70600	铜-镍，10%	余量[16]	0.05[35]	1.0～1.8	1.0[35]	9.0～11.0	—	1.0	[35]
C70610	—	余量[16]	0.01	1.0～2.0	—	10.0～11.0	—	0.50～1.0	0.058
									0.05C
C70690	—	余量[16]	0.001	0.005	0.001	9.0～11.0	—	0.001	[36]
C70700	—	余量[16]	—	0.05	—	9.5～10.5	—	0.50	—
C70800	铜-镍，11%	余量[16]	0.05	0.10	0.20	10.5～12.5	—	0.15	—
C71000	铜-镍，20%	余量[16]	0.05	1.0	1.0	19.0～23.0	—	1.0	—
C71100	—	余量[16]	0.05	0.10	0.20	22.0～24.0	—	0.15	—
C71300	—	余量[16]	0.05	0.20	1.0	23.5～26.5	—	1.0	—
C71500	铜-镍，30%	余量[16]	0.05[35]	0.40～1.0	1.0[35]	29.0～33.0	—	1.0	[35]
C71580	—	余量[16]	0.05	0.50	0.05	29.0～33.0	—	0.30	[37]
C71581	—	余量[16]	0.02	0.40～0.7	—	29.0～32.0	—	1.0	[38]
C71590	—	余量	0.001	0.15	0.001	29.0～31.0	0.001	0.50	[36]
C71640	—	余量[16]	0.01	1.7～2.3	—	29.0～32.0	—	1.5～2.5	0.03S
									0.06C
C71700	—	余量[16]	—	0.40～1.0	—	29.0～33.0	—	—	0.30～0.7Be
C71900	—	余量[16]	0.015	0.50	0.05	28.0～33.0	—	0.20～1.0	2.2～3.0Cr
									0.02～0.35Zr
									0.01～0.20Ti
									0.04C
									0.25Si
									0.15S
									0.02P
C72150	—	余量[16]	0.05	0.10	0.20	43.0～46.0	—	0.05	0.10C
									0.50Si
C72200	—	余量[20]	0.05[35]	0.50～1.0	1.0[35]	15.0～18.0	—	1.0	0.30～0.7Cr
									0.03Si
									0.03Ti
									[35]

（续）

铜镍合金

铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%)							
		Cu(包括 Ag)	Pb	Fe	Zn	Ni(包括 Co)	Sn	Mn	其他注名元素
C72420	—	余量[21]	0.02	0.7~1.2	0.20	13.5~16.5	0.10	3.5~5.5	1.0~2.0Al
									0.50Cr
									0.15Si
									0.05Mg
									0.15S
									0.01P
									0.05C
C72500	—	余量[20]	0.05	0.6	0.50	8.5~10.5	1.8~2.8	0.20	—
C72650	—	余量[21]	0.01	0.10	0.10	7.0~8.0	4.5~5.5	0.10	—
C72700	—	余量[21]	0.02	0.50	0.50	8.5~9.5	5.5~6.5	0.5~0.30	0.10Nb
									0.15Mg
C72800	—	余量[21]	0.005	0.50	1.0	9.5~10.5	7.5~8.5	0.05~0.30	0.10Al
									0.001B
									0.001Bi
									0.10~0.30Nb
									0.005~0.15Mg
									0.005P
									0.0025S
									0.02Sb
									0.05Si
									0.01Ti
C72900	—	余量[21]	0.02[39]	0.50	0.50	14.5~15.5	7.5~8.5	0.30	0.10Nb
									0.15Mg
C72950	—	余量[21]	0.05	0.6	—	20.0~22.0	4.5~5.7	0.6	—

铜-镍-锌合金(锌白铜)

铜合金编号	以前商品名	化学成分(质量分数,%)						
		Cu[16](包括 Ag)	Pb	Fe	Zn	Ni(包括 Co)	Mn	其他注名元素
C73500	—	70.5~73.5	0.10	0.25	余量	16.5~19.5	0.50	—
C74000	—	69.0~73.5	0.10	0.25	余量	9.0~11.0	0.50	—
C74300	—	63.0~66.0	0.10	0.25	余量	7.0~9.0	0.50	—
C74500	锌白铜，65~10	63.5~66.5	0.10[40]	0.25	余量	9.0~11.0	0.50	—
C75200	锌白铜，65~18	63.5~66.5	0.05	0.25	余量	16.5~19.5	0.50	—
C75400	锌白铜，65~15	63.5~66.5	0.10	0.25	余量	14.0~16.0	0.50	—
C75700	锌白铜，65~12	63.5~66.5	0.05	0.25	余量	11.0~13.0	0.50	—

（续）

铜-镍-锌合金（锌白铜）								
铜合金编号	以前商品名	化学成分（质量分数,%）						
		Cu[16]（包括 Ag）	Pb	Fe	Zn	Ni（包括 Co）	Mn	其他注名元素
C76000	—	60.0～63.0	0.10	0.25	余量	16.5～19.5	0.50	—
C76200	—	57.0～61.0	0.10	0.25	余量	11.0～13.5	0.50	—
C76400	—	58.5～61.5	0.05	0.25	余量	16.5～19.5	0.50	—
C76700	锌白铜，56.5～15	55.0～58.0	—	—	余量	14.0～16.0	0.50	—
C77000	锌白铜，55～18	53.5～56.5	0.05	0.25	余量	16.5～19.5	0.50	—
C77300	—	46.0～50.0	0.05	—	余量	9.0～11.0	—	0.01Al
								0.25P
								0.04～0.25Si
C77400	—	43.0～47.0	0.20	—	余量	9.0～11.0	—	—
C78200	—	63.0～67.0	1.5～2.5	0.35	余量	7.0～9.0	0.50	—
C79000	—	63.0～67.0	1.5～2.2	0.35	余量	11.0～13.0	0.50	—
C79200	—	59.0～66.5	0.8～1.4	0.25	余量	11.0～13.0	0.50	—
C79800	—	45.5～48.5	1.5～2.5	0.25	余量	9.0～11.0	1.5～2.5	—

注：所列成分值为最大百分数，除非表明为范围或最大值。

①这些都是高传导性铜，它们在退火状态下具有最小100% IACS的传导性。　②铜按照其杂质总量与100%之间的差进行确定。　③另用以下最高极限值（体积分数）：Bi，1ppm（0.0001%）；Cd，1ppm（0.0001%）；Fe，10ppm（0.0010%）；Pb，5ppm（0.0005%）；Mn，0.5ppm（0.00005%）；Hg，1ppm（0.0001%）；Ni，10ppm（0.0010%）；氧，5ppm（0.0005%）；Se，3ppm（0.0003%）；Ag，25ppm（0.0025%）；S，15（0.0015%）；Sn，2ppm（0.0002%）；Zn，1ppm（0.0001%）。　④包括P。　⑤另用以下最高极限值：氧和微量元素可随工艺而变。　⑥Se，2ppm（0.0002%）；Bi，1.0ppm（0.00010%）；组合总量，Te+Se+Bi，3ppm（0.0003%）；Sn，5ppm（0.0005%）；Pb，5ppm（0.0005%）；Fe，10ppm（0.0010%）；Ni，10ppm（0.0010%）；S，15（0.0015%）；Ag，25ppm（0.0025%）；氧，100～650ppm（0.010～0.065%）。总的最高允许含量为65ppm（0.0065%），不包括氧。　⑦可按协议加入少量Cd或其他元素，用于提高在高温下的抗软化能力。　⑧包括B+P。　⑨这包括氧和游离铜，其中含有允许量的P。　⑩包括Te+Se。　⑪包括Cd，用锂或其他适当允许的元素进行脱氧。　⑫包括Cu+Ag+Sn。　⑬包括Te。　⑭包括按协议量的无氧或脱氧级（如磷、硼、锂或其他元素）。　⑮所有的铝均以 Al_2O_3 而存在，以 Cu_2O 形式的含氧量0.04%以及可忽略不计的量而存在于铜固溶体里。　⑯Cu+所指定元素的总和，最低99.5%。　⑰Ni+Co，最低0.20%；Ni+Fe+Co，最高0.6%。　⑱包括Co。　⑲Cu+所指定元素的总和，最低99.9%。　⑳Cu+所指定元素的总和，最低99.8%。　㉑Cu+所指定元素的总和，最低99.7%。　㉒Cu+所指定元素的总和，最低99.6%。　㉓用于外径大于5in的管材，Pb可<0.20%。　㉔用于平板产品，铁含量最高0.10%。　㉕Cu，最低61.0%用于圆棒。　㉖按协议，Pb可以降低至1.0%。　㉗用于管制品，最低Sn含量可为0.9%。　㉘Cu+Sn+Fe+P，最低99.5%。　㉙Cu+所指定元素的总和，最低99.85%。　㉚当产品用于后续焊接用途并由采购商规定时，Cr、Cd、Zr和Zn分别最高可达0.05%。　㉛Fe含量不可超过Ni含量。　㉜不包括Co。　㉝Fe+Co，1.8～2.3%。　㉞Al+Zn，25.1%～27.1%。　㉟另用以下最高极限值：当产品将用于后续焊接用途，并由采购商规定，0.50% Zn、0.02% P、0.02% Pb、0.02% S（对于C71110 0.008% S）和0.05% C。　㊱另用以下最高极限值：0.02% C、0.015% Si、0.003% S、0.002% Al、0.001% P、0.0005% Hg、0.001% Ti、0.001% Sb、0.001% As、0.001% Bi、0.05% Co、0.10% Mg和0.005%氧。对于C70690，Co最高达0.02%。　㊲另用以下最高极限值：0.07% C、0.15% Si、0.024% S、0.05% Al和0.03% P。　㊳0.02% P，最高；0.25% Si，最高；0.01% S，最高；0.20%～0.50% Ti。　㊴0.005% Pb，最高，用于热轧。　㊵0.05% Pb，最高，用于圆棒和线材。

引自铜业发展协会。

表3.2-7　锻压铜和铜合金的性能

合金编号	产品形式①	力学性能②				50mm (2in)长的伸长率② (%)	切削性评估③ (%)
		抗拉强度		屈服强度			
		MPa	ksi	MPa	ksi		
C10100	F, R, W, T, P, S	221~455	32~66	69~365	10~53	55~4	20
C10200	F, R, W, T, P, S	221~455	32~66	69~365	10~53	55~4	20
C10300	F, R, T, P, S	221~379	32~55	69~345	10~50	50~6	20
C10400、C10500、C10700	F, R, W, S	221~455	32~66	69~365	10~53	55~4	20
C10800	F, R, T, P	221~379	32~55	69~345	10~50	50~4	20
C11000	F, R, W, T, P, S,	221~455	32~66	69~365	10~53	55~4	20
C11100	W	455	66	—	—	1500mm (60in)伸长1.5mm	20
C11300, C11400, C11500, C11600	F, R, W, T, S	221~455	32~66	69~365	10~53	55~4	20
C12000, C12100	F, T, P	221~393	32~57	69~365	10~53	55~4	20
C122000, C12210	F, R, T, P, S	221~379	32~55	69~345	10~50	45~8	20
C12500, C12700, C12800, C12900, C13000	F, R, W, S	221~462	32~67	69~365	10~53	55~4	20
C14200	F, R, T	221~379	32~55	69~345	10~50	45~8	20
C14300	F	221~400	32~58	76~386	11~56	42~1	20
C14310	F	221~400	32~58	76~386	11~56	42~1	20
C14500, C14510, C14520	F, R, W, T, S	221~386	32~56	69~352	10~51	50~3	85
C14700, C14710, C14720	F, R, W, S	221~393	32~57	69~379	10~55	52~8	85
C15000	R, W	200~524	29~76	41~496	6~72	54~1.5	20
C15100	F	262~469	38~68	69~455	10~66	36~2	20
C15500	F	276~552	40~80	124~496	18~72	40~3	20
C15710	R, W	324~724	47~105	268~689	39~100	20~10	—
C15715	F, R, S	358~607	52~88	283~579	41~84	27~1	20
C15720	F, R	462~614	67~89	365~586	53~85	20~3.5	—
C15735	R	483~586	70~85	414~565	60~82	16~10	—
C15760	F, R	483~648	70~94	386~552	56~80	20~8	—
C16200, C16210	F, R, W	241~689	35~100	48~476	7~69	57~1	20
C16500	F, R, W	276~655	40~95	97~490	14~71	53~1.5	20
C17000	F, R	483~1310	70~190	221~1172	32~170	45~3	20
C17200	F, R, W, T, P, S	469~1462	68~212	172~1344	25~195	48~1	20
C17300	R	469~1479	68~200	172~1255	25~182	48~3	50
C17400	F	620~793	90~115	172~758	25~110	12~4	20
C17410	F, R	758~896	110~130	655~758	95~110	12~4	—
C17500, C17510	F, R, S, T	310~793	45~115	172~758	25~110	28~5	—
C18090	F	414~690	60~100	345~600	50~87	25~9	20

（续）

合金编号	产品形式[1]	力学性能[2]				50mm(2in)长的伸长率[2]（%）	切削性评估[3]（%）
		抗拉强度		屈服强度			
		MPa	ksi	MPa	ksi		
C18100	R，W	483～586	70～85	434～517	63～75	13～4	—
C18135	F，R，W	221～483	32～70	69～434	10～63	55～10	20
C18200，C18400，C18500	F，W，R，S，T	234～593	34～86	97～531	14～77	40～5	20
C18700	R	221～379	32～55	69～345	10～50	45～8	85
C18900	R，W	262～655	38～95	62～359	9～52	48～14	20
C19000	F，R，W	262～793	38～115	138～552	20～80	50～2	30
C19100	R，F	248～717	36～104	69～634	10～92	27～6	75
C19200	F，T	255～531	37～77	76～510	11～74	40～2	20
C19210	F	296～538	43～78	152～531	22～77	38～1.5	20
C19220	F	310～524	45～76	—	—	30～5	—
C19280	F	538～572	78～83	—	—	12～3	—
C19400	F	310～524	45～76	165～503	24～73	32～2	20
C19500	F	552～669	80～97	448～655	65～95	15～2	20
C19700	F	344～517	50～75	165～503	24～73	32～2	20
C21000	F，W	234～441	34～64	69～400	10～58	45～4	20
C22000	F，R，W，T	255～496	37～72	69～427	10～62	50～3	20
C22600	F，W	269～669	39～97	76～427	11～62	46～3	30
C23000	F，W，T，P	269～724	39～105	69～434	10～63	55～3	30
C24000	F，W	290～862	42～125	83～448	12～65	55～3	30
C26000，C26100，C26130，C26200	F，R，W，T，S	303～896	44～130	76～448	11～65	66～3	30
C26800，C27000	F，R，W	317～883	46～128	97～427	14～62	65～3	30
C27400	T，W	386～510	56～74	159～379	23～55	50～10	35
C28000	F，R，T	372～510	54～74	145～379	21～55	52～10	40
C31400	F，R	255～414	37～60	83～379	12～55	45～10	80
C31600	F，R	255～462	37～67	83～407	12～59	45～12	80
C32000	R，S	276～496	40～72	110～414	16～60	45～4	90
C33000	T	324～517	47～75	103～414	15～60	60～7	60
C33200	T	359～517	52～75	138～414	20～60	50～7	80
C33500	F	317～510	46～74	97～414	14～60	65～8	60
C34000	F，R，W，S	324～607	47～88	103～414	15～60	60～7	70
C34200	F，R	338～586	49～85	117～427	17～62	52～5	90
C34900	R，W	365～469	53～68	110～379	16～55	72～18	50
C35000	F，R	310～655	45～95	90～483	13～70	66～1	70
C35300	F，R	338～586	49～85	117～427	17～62	52～5	90
C35600	F	338～510	49～74	117～414	17～60	50～7	100

（续）

合金编号	产品形式[①]	力学性能[②]				50mm (2in)长的伸长率[②]（%）	切削性评估[③]（%）
		抗拉强度		屈服强度			
		MPa	ksi	MPa	ksi		
C36000	F, R, S	338 ~ 469	49 ~ 68	124 ~ 310	18 ~ 45	53 ~ 18	100
C36500 至 C36800[④]	F	372	54	138	20	45	60
C37000, C37100	T	372 ~ 552	54 ~ 80	138 ~ 414	260	40 ~ 6	70
C37700[⑤]	R, S	359	52	138	20	45	80
C38500[⑤]	R, S	414	60	138	20	30	90
C40500	F	269 ~ 538	39 ~ 78	83 ~ 483	12 ~ 70	49 ~ 3	20
C40800	F	2545	42 ~ 79	517	13 ~ 75	43 ~ 3	20
C41100	F, W	269 ~ 731	39 ~ 106	76 ~ 496	11 ~ 72	13 ~ 2	20
C41300	F, R, W	283 ~ 724	41 ~ 105	83 ~ 565	12 ~ 82	45 ~ 2	20
C41500	F	317 ~ 558	46 ~ 81	117 ~ 517	17 ~ 75	44 ~ 2	30
C42200	F	296 ~ 607	43 ~ 88	103 ~ 517	15 ~ 75	46 ~ 2	30
C42500	F	310 ~ 634	45 ~ 92	124 ~ 524	18 ~ 76	49 ~ 2	30
C43000	F	317 ~ 648	46 ~ 94	124 ~ 503	18 ~ 73	55 ~ 3	30
C43400	F	310 ~ 607	45 ~ 88	103 ~ 517	15 ~ 75	49 ~ 3	30
C43500	F, T	317 ~ 552	46 ~ 80	110 ~ 469	16 ~ 68	46 ~ 7	30
C44300, C44400, C44500	F, W, T	331 ~ 379	48 ~ 55	124 ~ 152	18 ~ 22	65 ~ 60	30
C46400 ~ C46700	F, R, T, S	379 ~ 607	55 ~ 88	172 ~ 455	25 ~ 66	50 ~ 17	30
C48200	F, R, S	386 ~ 517	56 ~ 75	172 ~ 365	25 ~ 53	43 ~ 15	50
C48500	F, R, S	379 ~ 531	55 ~ 77	172 ~ 365	25 ~ 53	40 ~ 15	70
C50500	F, W	276 ~ 545	40 ~ 79	97 ~ 345	14 ~ 50	48 ~ 4	20
C51000	F, R, W, T	324 ~ 965	47 ~ 140	131 ~ 552	19 ~ 80	64 ~ 2	20
C51100	F	317 ~ 710	46 ~ 103	345 ~ 552	50 ~ 80	48 ~ 2	20
C52100	F, R, W	379 ~ 965	55 ~ 140	165 ~ 552	24 ~ 80	70 ~ 2	20
C52400	F, R, W	455 ~ 1014	66 ~ 147	193（退火）	28（退火）	70 ~ 3	20
C54400	F, R	303 ~ 517	44 ~ 75	131 ~ 434	19 ~ 63	50 ~ 16	80
C60800	T	414	60	186	27	55	20
C61000	R, W	483 ~ 552	70 ~ 80	207 ~ 379	30 ~ 55	65 ~ 25	20
C61300	F, R, T, P, S	483 ~ 586	70 ~ 85	207 ~ 400	30 ~ 58	42 ~ 35	30
C61400	F, R, W, T, P, S	524 ~ 614	76 ~ 89	228 ~ 414	33 ~ 60	45 ~ 32	20
C61500	F	483 ~ 1000	70 ~ 145	152 ~ 965	22 ~ 140	55 ~ 1	30
C61800	R	552 ~ 586	80 ~ 85	269 ~ 293	39 ~ 42.5	28 ~ 23	40
C61900	F	634 ~ 1048	92 ~ 152	338 ~ 1000	49 ~ 145	30 ~ 1	—
C62300	F, R	517 ~ 676	75 ~ 98	241 ~ 359	35 ~ 52	35 ~ 22	50
C62400	F, R	621 ~ 724	90 ~ 105	276 ~ 359	40 ~ 52	18 ~ 14	50
C62500[⑤]	F, R	689	100	379	55	1	20

（续）

合金编号	产品形式①	力学性能②				50mm(2in)长的伸长率②(%)	切削性评估③(%)
		抗拉强度		屈服强度			
		MPa	ksi	MPa	ksi		
C63000	F，R	621～814	90～118	345～517	50～75	20～15	30
C63200	F，R	621～724	90～105	310～365	45～53	25～20	30
C63600	R，W	414～579	60～84	—	—	64～29	40
C63800	F	565～896	82～130	372～786	54～114	36～4	—
C64200	F，R	517～703	75～102	241～469	35～68	32～22	60
C64400	F	483～952	70～138	345～903	50～131	37～3	—
C65100	R，W，T	276～655	40～95	103～476	15～69	55～11	30
C65400	F	276～793	40～115	130～744	20～108	40～3	20
C65500	F，R，W，T	386～1000	56～145	145～483	21～70	63～3	30
C66700	F，W	315～689	45.8～100	83～638	12～92.5	60～2	30
C67400	F，R	483～634	70～92	234～379	34～55	28～20	25
C67500	R，S	448～579	65～84	207～414	30～60	33～19	30
C68700	T	414	60	186	27	55	30
C68800	F	565～889	82～129	379～786	55～114	36～2	—
C69000	F	496～896	72～130	345～807	50～117	40～2	—
C69400	R	552～689	80～100	276～393	40～57	25～20	30
C70250	F	586～758	85～110	552～784	80～105	40～3	20
C70400	F，T	262～531	38～77	276～524	40～76	46～2	20
C70600	F，T	303～414	44～60	110～393	16～57	42～10	20
C71000	F，W，T	338～655	49～95	90～586	13～85	40～3	20
C71300	F	338～655	49～95	90～586	13～85	40～3	20
C71500	F，R，T	372～517	54～75	138～483	20～70	45～15	20
C71700	F，R，W	483～1379	70～200	207～1241	30～180	40～4	20
C72200	F，T	317～483	46～70	124～455	18～66	46～6	—
C72500	F，R，W，T	379～827	55～120	152～745	22～108	35～1	20
C72600	F，R，W，T，P，S	565～793	82～115	496～683	72～99	12～1	—
C72700	F，W，T，P，S	455～1144	66～166	200～986	29～143	36～1.7	—
C72800	F，W，T，P，S	524～1372	76～199	434～1351	63～196	23～3.7	10
C72900	F，R，T，P，S	931～1379	135～200	758～1172	110～170	7～2.4	—
C73500	F，R，W，T	345～758	50～110	103～579	15～84	37～1	20
C74500	F，W	338～896	49～130	124～524	18～76	50～1	20
C75200	F，R，W	386～710	56～103	172～621	25～90	45～3	20
C75400	F	365～634	53～92	124～545	18～79	43～2	20
C75700	F，W	359～641	52～93	124～545	18～79	48～2	20
C76200	F，T	393～841	57～122	145～758	21～110	50～1	—

（续）

合金编号	产品形式①	力学性能②				50mm (2in)长的伸长率②(%)	切削性评估③(%)
		抗拉强度		屈服强度			
		MPa	ksi	MPa	ksi		
C76390	R	621	90	586	85	6	40
C77000	F，R，W	414～1000	60～145	186～621	27～90	40～2	30
C72200	F，T	317～483	46～70	124～455	18～66	46～6	—
C78200	F	365～627	53～91	159～524	23～76	40～3	60

①F，平板产品；R，圆棒；W，线材；T，管材；P，管线；S，型材。　②范围从最软到最硬的产品形式。标准铜合金的强度取决于其状态(经退火的晶粒大小或冷变形加工的程度)以及轧制品的截面厚度。范围包括每一种合金的标准状态。③对于C36000，按100%。　④数值适用于热轧材料。　⑤数值适用于挤制材料。

引自铜业发展协会。

纯铜合金。也称之为铜(C10100～C15900)，为了保持高电导率，采用最高纯度的铜在惰性气氛中熔化和铸造(无氧或OF，铜，C10200)。较为常用的是铜在控制含氧量(0.04% O，如在电解韧铜或ETP，铜C11000中)的条件下进行铸造的，通过氧化将杂质从溶体中熔炼去除。利用添加少量的不同元素如以磷进行脱氧的均属于此类合金(C12200或Cu-0.03P)，还有那些通过加入微量合金就可以大大提高其抗软化的性能的合金，如含银铜合金(C10500，Cu-0.034Ag最低)和含锆合金(C15000和C15100，Cu-0.1Zr)。

高铜合金(16000～19900)。此代号用于通过弥散和析出物来提高其强度和抗软化性能，并同时能保持高电导率的合金：在Cu-(1.0-2.5)Fe合金(C19200、C19400)中铁的弥散，在Cu-1Cr(C18200)中的铬析出物以及在Cu-(0.3-2.0)Be-Co、Ni时效硬化合金(C17200、C17410和C17500)中的共格析出物。

黄铜合金。这是一个相当大的铜-锌合金家族。它们的特征编号代表了铜-锌二元合金(C20500～C28000)，用来表示高达35% Zn的大范围固溶体，它们具有优异的成形性和加工硬化强度，且其成本合理(通常称为α黄铜)。其低于15% Zn的合金具有良好的耐腐蚀性和耐应力腐蚀性，超过15% Zn的合金需要经过消除应力的热处理，用于防止发生应力腐蚀，但在一定的条件下会对脱锌作用产生敏感。高于35%～40% Zn的合金含有体心立方的β相，尤其在高温下易于进行热挤制和锻造(例如Cu-40Zn的合金C28000)。当β合金通过添加1%～4% Pb或新近采用的铋时也能被进行热变形加工，因为加入的元素能促使粗大颗粒进行弥散，以此使各种工业用合金Cu-Zn-Pb合金(C31200～C38500)形成优异的切削加工特性。锡黄铜(C40400～C49000)含有从0.3%～3.0%的不同含锡量，用于提高黄铜合金的耐腐蚀性和强度。铜-锌管材合金如C44300(Cu-30Zn-1Sn)除了能改善其耐腐蚀性能以外，锡的加入还使其具有各种电工联接件材料如C42500(Cu-10Zn-2Sn)所需要的综合强度、成形性和电导率的性能。一组其他铜-锌合金(C66400～C69900)也能通过铝、硅和锰的固溶硬化以及借助加入铁的弥散硬化来提高强度和耐腐蚀性。

青铜合金。它们由若干主要以固溶合金元素得名的合金家族构成。人们所熟悉的锡青铜(C50100～C54400)已形成一族含有从名义0.8% Sn(C50100)到10% Sn(C54400)的具有良好加工硬化的固溶体合金，通常还有少量用于脱氧的磷。这些合金拥有强度、成形性、抗软化性、电导率以及耐腐蚀性的优异性能组合。含有2%～15% Al(C60800～C64200)的铝青铜合金借助这种元素的加入得到良好的固溶强化、加工硬化性和耐腐蚀性。铝青铜通常还含有1%～5% Fe，使实现元素的弥散来促进弥散强化和晶粒大小的控制。硅青铜合金(C64700～C66100)一般通过固溶硬化和加工硬化获得很好的强度，有时也能借助锡的加入得到增强，此外还能得到优异的耐应力腐蚀及一般腐蚀性。

铜镍合金。它是由铜-镍合金(C70100～C72900)构成的，它利用铜对镍的完全固溶性而获得一组单相合金(例如Cu-10Ni-1.5Fe的C70600，和Cu-30Ni-0.8Fe的C71500)，它们具有优异的耐腐蚀性和强度。由于与第三种元素形成硬化相，铜-镍合金家族还包括不同的弥散硬化和析出硬化合金，例如可以在C70250(Cu-3Ni-0.7Si-0.15Mg)中的Ni_2Si和从Cu-Ni-Sn合金(例如Cu-10Ni-8Sn的C72700)中得到的调幅分解引起的硬化。

铜-镍-锌合金。也称为锌白铜，是一组经固溶强

化和加工硬化的合金，在 Cu-(4-26) Ni-(3-30) Zn 的三元合金系统中有着镍-锌成分的不同含量，旨在提高其强度、成形性和耐腐蚀及锈蚀性，也有时为其白色金属光泽的用途之需。

锻压铜合金的强化机制

固溶硬化。铜可以借助于各种普通的方法进行硬化，而不会对塑性和电导率产生过于不利的影响。从冶金学上看，能单独或组合地应用于铜合金的各种普通强化机制有：固溶和加工硬化以及弥散颗粒和析出硬化。通常能用于固溶硬化的元素为锌、镍、锰、铝、锡和硅，近似按其效果逐渐增大而排列。工业上能作为固溶成分应用的全部范围里的各种合金元素含量高达：35% Zn、50% Ni（甚至超过）、50% Mn、9% Al、11% Sn 和 4% Si。由每一种元素或各种元素的特定组合而获得的相对固溶强化的程度是由溶质干扰位错运动的能力所决定的，并且反映为对退火状态就具有的加工硬化速率，图 3.2-3 中的曲线所示的抗拉强度因冷变形加工而得到增加。

加工硬化。这是应用于大部分铜合金的主要硬化

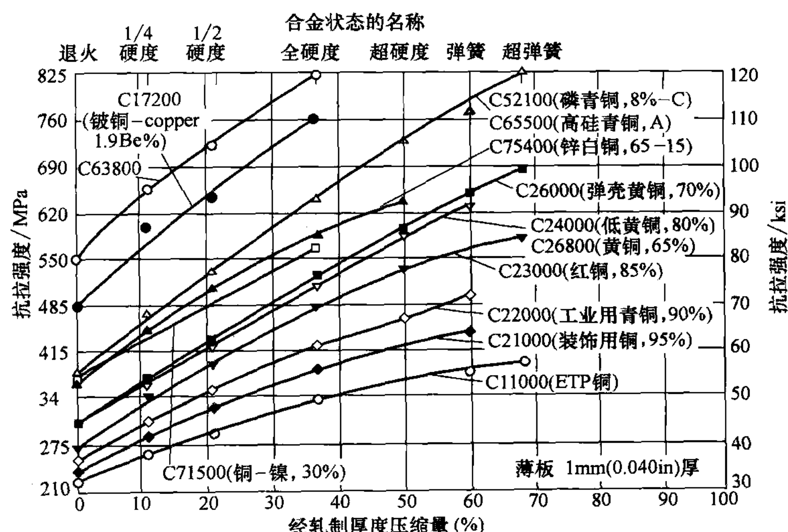


图 3.2-3　受轧制（状态）厚度压缩百分比影响的单相铜合金的抗拉强度。曲线的斜率逐渐变小表明，加工硬化率的降低和经受再拉能力的提高。ETP，电解韧铜

机制，其硬化的程度取决于合金化元素的种类和含量，以及其合金化元素是否留存于固溶体中或是否形成弥散相或析出沉淀相。即使那些能进行工业时效硬化的合金，也常是以轧制硬化的状态供货；即它们可以被冷变形加工工艺处理和/或进行时效硬化热处理。对于含量较低的合金（例如低于 ~12% Zn 或 ~3% Al），其工艺处理所产生的位错会发展成为位错结和位错胞，并当厚度压缩量超过 ~65% 时，会形成一些的狭窄剪切带。在经过近 90% 的冷变形加工之后，开始形成清晰的“铜”或“金属”晶体织构。随着使堆垛层错的能量降低的固溶体合金含量的增加，平面滑移成为占主导的位错机制，并导致较高的加工硬化。对于这些元素含量较高合金，超过近 40% 的冷变形加工、堆垛层错、剪切带和形变孪晶都会变成重要的变形机制，超过 90% 的冷变形加工将导致成为“黄铜”或“合金”型的晶体学形变织构并伴生各向异性的性能。图 3.2-4 所示是退火 Cu-30Zn 合金（C26000）因冷变形加工而造成的拉伸性能的不同。几种所选的单相铜合金通过冷变形加工而形成的不同加工硬化程度如图 3.2-3 中的冷轧曲线所示。许多铜合金都是以锻压的形式被使用的，而这种锻压形式还要根据在加工硬化强度与成形性之间所要求的组合对其加工状态作出抉择，而不管其零件是被直接使用还

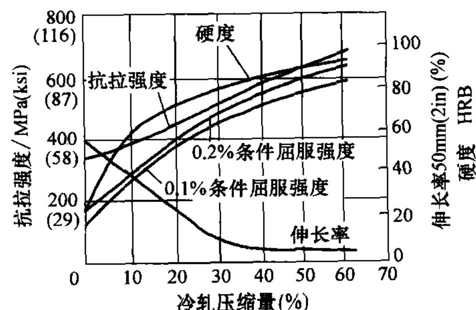


图 3.2-4　冷轧对退火铜合金 C26000 强度、硬度和塑性的影响，冷轧的厚度压缩量变化达到 62%

是供其后续制造之用。

弥散强化。这也适用于铜合金的硬化、晶粒大小的控制和形成抗软化的能力，可以铜-铁合金 C19200 或 C19400、铝青铜 C61300 或 C63380 中的铁颗粒为其例证。例如在合金 C63800（Cu-2.8Al-1.8Si-0.4Co）中的硅化钴颗粒，通过细晶粒的控制和弥散硬化，使其合金获得高强度同时又不失其应有的良好成形性。合金 C63800 具有退火抗拉强度［570MPa（82ksi）］和轧制状态的抗拉强度［660～900MPa（96～130ksi）］。具有格外优良的热稳定性的合金还可开发应用粉末冶金（P/M）技术，将 Al_2O_3 颗粒（其大小为 3～12nm）弥散融入铜的基体材料里，精加工成圆棒、线材和带制品。从 C15715～C15760 的合金家族的抗软化能力高达 800℃（1472℉）。有关氧化物弥散强化铜的详细内容将在本章“铜的粉末冶金制品”一节中介绍。

析出硬化。时效硬化机制应用于极少但却很重要的一些能降低硬化相溶解度的铜合金里。铍-铜系统包括一系列锻压和铸造的时效硬化合金，如 UNS 从 C17000～C17530 和从 C82000～C82800。锻压合金含有 0.2%～2.0% Be 和 0.3%～2.7% Co（或高至2.2% Ni）。它们在 760～955℃（1400～1750℉）的温度范围里进行固溶热处理，然后在 260～565℃（500～1050℉）的范围里时效硬化生成富铍的共格析出物，根据一定的合金和所要求的性能组合来选择其特定温度（见图 3.2-5）。在时效过程中的析出工序包括富溶质 G-P 区域的形成以及其后 γ′和 γ″亚稳态中间相的共格片晶的逐一生成。过度时效是以 B2 顺序结构的平衡 γ-BeCu 相外观为标志的，那些足够大且能在光学显微镜中观察到的晶粒内和晶界上的颗粒。钴和镍的加入形成平衡（Cu、Co 或 Ni）Be 的弥散相，用于限制在高温下的固溶退火过程中在两相区里的晶粒生长（见图 3.2-5b）。固溶退火后所进行的冷变形加工工序往往用于改善时效硬化的效果。例如，合金 C17200（Cu-1.8Be-0.4Co）可以通过处理达到高强度，即固溶化后的抗拉强度（470MPa 或 68ksi），经过冷轧达到的硬状态的抗拉强度（755MPa 或 110ksi），以及经时效后的抗拉强度（1415MPa 或 205ksi）。尽管它们在工业上属于可热处理（固溶化）的状态，然而铍-铜合金一般是以轧制硬化的状态供货，并具有适合其应用的强度/塑性/传导性的最佳组合。

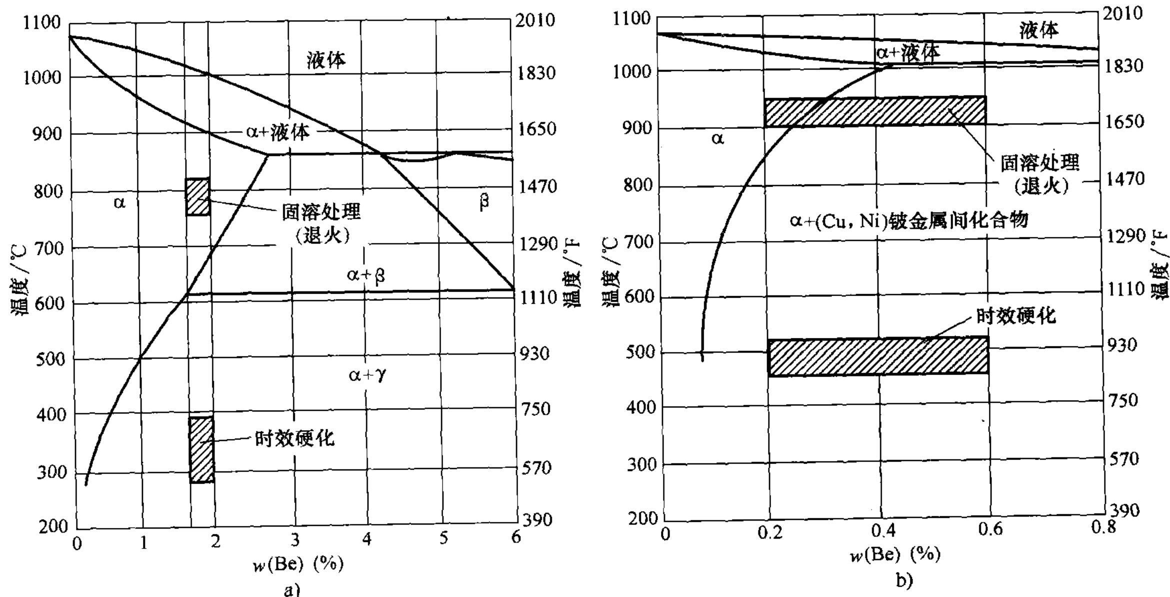


图 3.2-5 铍铜合金相图

a）高强度合金如 C17200 的二元成分 b）高传导合金如 C17510 的伪二元成分

其他时效硬化铜合金包括铬铜，它含有 0.4%～1.2% Cr（C18100、C18200 和 C18400），这些合金在时效时会形成由各种纯铬析出物和弥散相颗粒构成的组织。Cu-Ni-Si 合金 C64700 和 C70250 通过 Ni_2Si 中间相的析出而时效硬化。作为 Cu-Ni-Sn 系统的 C71900 和 C72700 中的成分，是可以通过调幅分解而硬化的，这是一种通过形成共格的、fcc 固溶相的周期性排列形成高强度和良好塑性的机制，其固溶相要用电子显微镜才能观察到。其中包括铍-铜的每一种这类合金都能通过形变热处理形成强度、成形性、电导率、抗软化以及抗应力松弛的各种独特组合。

表 3.2-8 铜合金铸件的成分、应用和特征

UNS 编号	其他代号，描述性名称（前 SAE 编号）	可采用的铸造工艺[①]	成分[②]（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜：高纯度铜，具有优异的电热传导性，使焊接性能得到改善的 C81200 脱氧。									
C80100	无氧铜	S，C，CL，PM，I，P	99.95[③]	—	—	—	—	—	—
C81100	高传导铜	S，C，CL，PM，I，P	99.70[③]	—	—	—	—	—	—
C81200	高传导铜	S，C，CL，PM，I，P	99.9[③]	—	—	—	—	—	0.045～0.065P
高铜合金：相对高强度铜并具有良好的电热传导性。强度一般与传导性成反比。适用于需要同时具有好的强度与传导性的用途上，如电阻焊的电极、开关的刀闸和零件、模具、离合器环、制动鼓以及轴承和轴套。在所有的铜合金中，铍铜的强度最高，并应用于轴承、机械产品和无打火安全工具。									
C81400	70C	S，C，CL，PM，I，P	98.5 最小[④]	—	—	—	—	—	0.02～0.10Be，0.6～1.0Cr
C81500	铬铜	S，C，CL，PM，I，P	98.0 最小[④]	0.10	0.02	0.10	—	0.10	0.15Si，0.10Al，0.40～1.5Cr
C81540	铬铜	S，C，CL，PM，I，P	95.1 最小[④,⑤]	0.10	0.02	0.10	2.0～3.0[⑥]	0.15	0.40～0.8Si，0.10Al，0.10～0.6Cr
C82000	10C	S，C，CL，PM，I，P，D	余量[④]	0.10	0.02	0.10	0.20	0.10	0.10Al，0.10Cr，0.15Si，2.40～2.70Co[⑥]，0.45～0.8Be
C82200	35C，53B	S，C，CL，PM，I，P	余量[④]	—	—	—	1.0～2.0	—	0.35～0.80Be，0.30Co
C82400	165C	S，C，CL，PM，I，P，D	余量[④]	0.10	0.02	0.10	0.20	0.20	0.20～0.65Co，1.60～1.85Be，0.15Al，0.10Cr
C82500	20C	S，C，CL，PM，I，P，D	余量[④]	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	1.90～2.25Be，0.35～0.70Co[⑥]，0.20～0.35Si，0.15Al，0.10Cr
C82510	增-Co20C	S，C，CL，PM，I，P，D	余量[④]	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	1.90～2.15Be，1.0～1.2Co[⑥]，0.20～0.35Si，0.15Al，0.10Cr
C82600	245C	S，C，CL，PM，I，P，D	余量[④]	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	2.25～2.55Be，0.35～0.65Co，0.20～0.35Si，0.15Al，0.10Cr
C82700	镍-铍铜	S，C，CL，PM，I，P	余量[④]	0.10	0.02	0.10	1.0～1.5	0.25	2.35～2.55Be，0.15Si，0.15Al，0.10Cr
C82800	275C	S，C，CL，PM，I，P，D	余量[④]	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	2.50～2.85Be，0.35～0.70Co[⑥]，0.20～0.35Si，0.15Al，0.10Cr

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-锡-锌和铜-锡-锌-铅合金（红铜和铅红铜）：高黄铜，有相当的电导率和中等的强度。用于电器硬件包括电缆接头。									
C83300	131，接触金属	S，C，CL	92. Ch 94.0[7,8]	1.0~2.0	1.0~2.0	2.0~6.0	—	—	—
C83400	407.5，商品青铜90/10，装饰金属	S，C，CL	88.0~92.0(g,h)	0.20	0.50	8.0~12.0	1.0	0.25	0.25Sb，0.08S，0.03P，0.005Si，0.005Al
C83450	含镍铅红铜	S，C，CL	87.0~89.0[7,8]	2.0~3.5	1.5~3.0	5.5~7.5	0.8~2.0[9]	0.30	0.25Sb，0.08S，0.03P[10]，0.005Al，0.005Si
C83500	含铅镍锡青铜	S，C，CL	86.0~88.0[7,8]	5.5~6.5	3.5~5.5	1.0~2.5	0.50~1.0[9]	0.25	0.25Sb，0.08S，0.03P[10]，0.005Al，0.005Si
铜-锡-锌和铜-锡-锌-铅合金（红铜或含铅红铜）：良好的耐腐蚀性、优异的铸造性和中等强度。铅含量可保证压力致密性。合金C83600是最重要的铸造合金之一，广泛应用于管道配件和与水有关的产品上。合金C83800的强度稍低，但有基本相似的性能和用途。									
C83600	115，85-5-5-5，高黄铜，（SAE40）	S，C，CL	84.0~86.0[7,8]	4.0~6.0	4.0~6.0	4.0~6.0	1.0[9]	0.30	0.25Sb，0.08S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C83800	120，83-4-6-7，商品红铜，液力青铜	S，C，CL	82.0~83.8[7,8]	3.3~4.2	5.0~7.0	5.0~8.0	1.0[9]	0.30	0.25Sb，0.08S，0.03P[10]，0.005Al，0.005Si
C83810	含镍铅红铜	S，C，CL	余量[7,8]	2.0~3.5	4.0~6.0	7.5~9.5	2.0[9]	0.50[11]	Sb[11]，As[11]，0.005Al，0.10Si
铜锡锌铅合金（含铅浅红铜）：一般用途的管道和硬件产品。具有良好的切削性和压力致密性。合金C84400是在美国市场上最普通的管道合金。									
C84200	101，80-5-2½-12½	S，C，CL	78.0~82.0[7,8]	4.0~6.0	2.0~3.0	10.0~16.0	0.8[9]	0.40	0.25Sb，0.08S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C84400	123，81-3-7-9，阀制品，81金属	S，C，CL	78.0~82.0[7,8]	2.3~3.5	6.0~8.0	7.0~10.0	1.0[9]	0.40	0.25Sb，0.08S，0.02P[10]，0.005Al，0.005Si
C84410	—	S，C，CL	余量[7,12]	3.0~4.5	7.0~9.0	7.0~11.0	1.0[9]	[13]	Sb[13]，0.01Al，0.20Si，0.05Bi
C84500	125，78金属	S，C，CL	77.0~79.0[7,8]	2.0~4.0	6.0~7.5	10.0~14.0	1.0[9]	0.40	0.25Sb，0.08S，0.02P[10]，0.005Al，0.005Si
C84800	130，76-3-6-15，76金属	S，C，CL	75.0~77.0[7,8]	2.0~3.0	5.5~7.0	13.0~17.0	1.0[9]	0.40	0.25Sb，0.08S，0.02P[10]，0.005Al，0.005Si

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-锌和铜-锌-铅合金（黄铜和含铅黄铜）：低成本、低至中等强度及具有良好切削性的一般性用途的铸造合金，在许多与水有关的用途里，包括船用硬件和汽车冷却系统中具有适中的耐腐蚀性。有些成分适用于金属模和压力铸造工艺。									
C85200	400，72-1-3-24，高铜黄铜	S，C，CL	70.0～74.0[7,14]	0.7～2.0	1.5～3.8	20.0～27.0	1.0[9]	0.6	0.20Sb，0.05S，0.02P，0.005Al，0.05Si
C85400	403，67-1-3-29，商品1号黄铜	S，C，CL，PM，I，P	65.0～70.0[7,19]	0.50～1.5	1.5～3.8	24.0～32.0	1.0[9]	0.7	0.35Al，0.05Si
C85500	60-40黄铜	S，C，CL	59.0～63.0[7,19]	0.20	0.20	余量	0.20[9]	0.20	0.20Mn
C85700	405.2，63-1-1-35，B2，金属模黄铜	S，C，CL，PM，I，P	58.0～64.0[7,14]	0.50～1.5	0.80～1.5	32.0～40.0	1.0[9]	0.7	0.8Al，0.05Si
C85800	405.1，压铸黄铜	S，C，CL，PM，I，P，D	57.0最小[7,19]	1.5	1.5	31.0～41.0	0.50[9]	0.50	0.05Sb，0.25Mn，0.05As，0.05S，0.01P，0.55Al，0.25Si
锰青铜和含铅锰青铜合金（高强度和含铅高强度黄铜）：具有高力学强度的合金，良好的耐腐蚀性和令人满意的铸造性。除C86400和C86700外均可以进行切削，其切削的容易度比含铅的合金差一些。合金C86300可达到超过115ksi（793MPa）的强度。应用于机械装备：齿轮、杆件、链轮以及用于淡水和海水的阀与泵中的机件。当合金C86300和C86400用于高强度的轴承时，要求配以经过硬化的轴。									
C86100	423，90000拉伸锰青铜	S，CL，PM，I，P	66.0～68.0[7,15]	0.20	0.20	余量	—	2.0～4.0	4.5～5.5Al，2.5～5.5Mn
C86200	423，95000拉伸锰青铜（SAE430A）	S，C，CL，PM，I，P，D	60.0～66.0[7,15]	0.20	0.20	22.0～28.0	1.0[9]	2.0～4.0	3.0～4.9Al，2.5～5.0Mn
C86300	424，110000拉伸锰青铜（SAE430B）	S，C，CL，PM，I，P	60.0～66.0[7,15]	0.20	0.20	22.0～28.0	1.0[9]	2.0～4.0	5.0～7.5Al，2.5～5.0Mn
C86400	420，60000拉伸锰青铜	S，C，CL，PM，I，P，D	56.0～62.0[7,15]	0.50～1.5	0.50～1.5	34.0～42.0	1.0[9]	0.40～2.0	0.50～1.5Al，0.10～1.5Mn

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数，%） Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
锰青铜和含铅锰青铜合金（高强度和含铅高强度黄铜）：具有高力学强度的合金，良好的耐腐蚀性和令人满意的铸造性。除C86400和C86700外均可以进行切削，其切削的容易度比含铅的合金差一些。合金C86300可达到超过115ksi(793MPa)的强度。应用于机械装备：齿轮、杆件、链轮以及用于淡水和海水的阀与泵中的机件。当合金C86300和C86400用于高强度的轴承时，要求配以经过硬化的轴。									
C86500	421，65000拉伸锰青铜(SAE43)	S，C，CL，PM，I，P	55.0～60.0[5,13]	1.0	0.40	36.0～42.0	1.0[9]	0.40～2.0	0.50～1.5Al，0.10～1.5Mn
C86700	422，80000拉伸锰青铜	S，C，CL，PM，I，P	55.0～60.0[7,15]	1.5	0.50～1.5	30.0～38.0	1.0[9]	1.0～3.0	1.0～3.0Al，0.10～3.5Mn
C86800	镍锰青铜	S，C，CL，PM，I，P	53.5～57.0[7,15]	1.0	0.20	余量	2.5～4.0[9]	1.0～2.5	2.0Al，2.5～4.0Mn
铜-硅合金（硅青铜和硅黄铜）：中至高强度合金，并具有良好的耐腐蚀性和令人满意的铸造性能。应用于机械产品和泵机件，此时兼具强度和耐腐蚀性是很重要的。在欧州和英国有类似的成分，一般用于压力铸造和金属模铸造。									
C87300	95-1-4，硅青铜	S，C，CL，PM，I，P	94.0最低[4]	—	0.20	0.25	—	0.20	3.5～4.5Si，0.80～1.5Mn
C87400	500	S，CL，PM，I，P，D	79.0最低[4]	—	1.0	12.0～16.0	—	—	0.80Al，2.5～4.0Si
C87500	500	S，CL，PM，I，P，D	79.0最低[4]	—	0.50	12.0～16.0	—	—	0.50Al，3.0～5.0Si
C87600	500，低锌硅黄铜	S，CL，PM，I，P，D	88.0最低[4]	—	0.50	4.0～7.0	—	0.20	3.5～5.5Si，0.25Mn
C87610	—	S，CL，PM，I，P，D	90.0最低[4]	—	0.20	3.0～5.0	—	0.20	3.0～5.0Si，0.25Mn
C87800	500，压铸硅黄铜	S，CL，PM，I，P，D	80.0最低[4]	0.25	0.15	12.0～16.0	0.20[9]	0.15	0.15Al，3.8～4.2Si，0.15Mn，0.01Mg，0.05S，0.01P，0.05As，0.05Sb
铜-锡合金（锡青铜）：硬而强的合金并具有良好的耐腐蚀性，尤其对于海水。作为轴承它们有很好的耐磨和耐冲击性。中等的切削性。广泛用于齿轮、蜗轮、轴承、船用配件、活塞环和泵机件。									
C90200	242，93-7-0-0	S，C，CL，PM，I，P	91.0～94.0[7,16]	6.0～8.0	0.30	0.50	0.50[9]	0.20	0.20Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si

（续）

UNS 编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其　他
铜-锡合金（锡青铜）：硬而强的合金并具有良好的耐腐蚀性，尤其对于海水。作为轴承它们有很好的耐磨和耐冲击性。中等的切削性。广泛用于齿轮、蜗轮、轴承、船用配件、活塞环和泵机件。									
C90300	225，88-8-0-4，海军"G"青铜，（SAE 620）	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 89.0[7,16]	7.5 ~ 9.0	0.30	3.0 ~ 5.0	1.0[9]	0.20	0.20Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C90500	210，88-10-0-2，铜，（SAE62）	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 89.0[7,24]	9.0 ~ 11.0	0.30	1.0 ~ 3.0	1.0[9]	0.20	0.20Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C90700	205，89-11，（SAE 65）	S，C，CL，PM，I，P	88.0 ~ 90.0[7,16]	10.0 ~ 12.0	0.50	0.50	0.50[9]	0.15	0.20Sb，0.05S，0.30P[10]，0.005Al，0.005Si
C90710	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[7,16]	10.0 ~ 12.0	0.25	0.05	0.10[9]	0.10	0.20Sb，0.05S，0.05 ~ 1.2P[10]，0.005Al，0.005Si
C90800	—	S，C，CL，PM，I，P	85.0 ~ 89.0[7,16]	11.0 ~ 13.0	0.25	0.25	0.50[9]	0.15	0.20Sb，0.05S，0.30P[10]，0.005Al，0.005Si
C90810	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[7,16]	11.0 ~ 13.0	0.25	0.30	0.50[9]	0.15	0.20Sb，0.05S，0.15 ~ 0.8P[10]，0.005Al，0.005Si
C90900	199，87-13-0-0	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 89.0[7,16]	12.0 ~ 14.0	0.25	0.25	0.50[9]	0.15	0.20Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C91000	197，85-14-0-1	S，C，CL，PM，I，P	84.0 ~ 86.0[7,16]	14.0 ~ 16.0	0.20	1.5	0.80[9]	0.10	0.20Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C91100	84-16-0-0	S，C，CL，PM，I，P	82.0 ~ 85.0[7,16]	15.0 ~ 17.0	0.25	0.25	0.50[9]	0.25	0.20Sb，0.055，1.0P[10]，0.0055Al，0.005Si
C91300	194，81-19	S，C，CL，PM，I，P	79.0 ~ 82.0[7,16]	18.0 ~ 20.0	0.25	0.25	0.50[9]	0.25	0.20Sb，0.05S，1.0P[10]，0.005Al，0.005Si
C91600	205N，88-10 ½-0-0-1 ½，镍齿轮青铜	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 89.0[7,16]	9.7 ~ 10.8	0.25	0.25	1.2 ~ 2.0[9]	0.20	0.20Sb，0.05S，0.30P[10]，0.005Al，0.005Si
C91700	86½-12-0-0-1½，镍齿轮青铜	S，C，CL，PM，I，P	84.0 ~ 87.0[7,16]	11.3 ~ 12.5	0.25	0.2S	1.20 ~ 2.0[9]	0.20	0.20Sb，0.05S，0.30P[10]，0.005Al，0.005Si

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-锡-铅合金（含铅锡青铜）：铅能改善这些锡青铜的切削性能，但不能有效影响材料的力学性能。这些合金在锡青铜中基本上是属于易切削的。其性能和用途与上一类的相似。									
C92200	245，88-6-1½-4½，海军“M”青铜，（SAE622）	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 90.0[7,8]	5.5 ~ 6.5	1.0 ~ 2.0	3.0 ~ 5.0	1.0[9]	0.25	0.25Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C92210	—	—	86.0 ~ 89.0[7,8]	4.5 ~ 5.5	1.7 ~ 2.5	3.0 ~ 4.5	0.7 ~ 1.0	0.25	0.25Sb，0.05S，0.03P，0.005Al，0.005Si
C92300	230，87-8-1-4，含铅“G”青铜	S，C，CL，PM，I，P	85.0 ~ 89.0[7,8]	7.5 ~ 9.0	0.30 ~ 1.0	2.5 ~ 5.0	1.0[9]	0.25	0.25Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C92310	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[7,8]	7.5 ~ 8.5	0.30 ~ 1.5	3.5 ~ 4.5	1.0[9]	—	0.03Mn，0.005Al，0.005Si
C92400	—	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 89.0[7,8]	9.0 ~ 11.0	1.0 ~ 2.5	1.0 ~ 3.0	1.0[9]	0.25	0.25Sb，0.05S，0.05 P[10]，0.005Al，0.005Si
C92410	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[7,8]	6.0 ~ 8.0	2.5 ~ 3.5	1.5 ~ 3.0	0.20[9]	0.20	0.25Sb，0.05Mn，0.005Al，0.005Si
C92500	200，87-11-1-0-1，（SAE640）	S，C，CL，PM，I，P	85.0 ~ 88.0[7]	10.0 ~ 12.0	1.0 ~ 1.5	0.50	0.8 ~ 1.5[9]	0.30	0.25Sb，0.05S，0.30P[10]，0.005Al，0.005Si
C92600	215，87-10-1-2	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 88.50[7,8]	9.3 ~ 10.5	0.8 ~ 1.5	1.3 ~ 2.5	0.7[9]	0.20	0.25Sb，0.05S，0.03P[10]，0.005Al，0.005Si
C92610	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[7,8]	9.5 ~ 10.5	0.30 ~ 1.5	1.7 ~ 2.8	1.0[9]	0.15	0.005Al，0.005Si，0.03Mn
C92700	206，88-10-2-0，（SAE63）	S，C，CL，PM，I，P	86.0 ~ 89.0[7,8]	9.0 ~ 11.0	1.0 ~ 2.5	0.7	1.0[9]	0.20	0.25Sb，0.05S，0.25P[10]，0.005Al，0.005Si
C92710	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[7,8]	9.0 ~ 11.0	4.0 ~ 6.0	1.0	2.0[9]	0.20	0.25Sb，0.05S，0.10P[10]，0.005Al，0.005Si
C92800	295，79-16-5-0 环铜	S，C，CL，PM，I，P	78.0 ~ 82.0[7,8]	15.0 ~ 17.0	4.0 ~ 6.0	0.8	0.80[9]	0.20	0.25Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C92810	—	S，C，CL，PM，I，P	78.0 ~ 82.0[7]	12.0 ~ 14.0	4.0 ~ 6.0	0.50	0.8 ~ 1.2[9]	0.50	0.25Sb，0.05S，0.05P[10]，0.005Al，0.005Si
C92900	84-10-2½-0-3½，含铅镍锡青铜	S，C，CL，PM，I，P	82.0 ~ 86.0[7]	9.0 ~ 11.0	2.0 ~ 3.2	0.25	2.8 ~ 4.0[9]	0.20	0.25Sb，0.05S，0.50P[10]，0.005Al，0.005Si

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[①]	成分[②]（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-锡-铅合金（高铅锡青铜）：最常用于轴承合金，常见于在中至高速运转的轴承里，如在电动机和电器里。合金C93200被认为是其中的一种重载合金。合金C93600的切削性能和抗咬死的能力得到改善。C93800是以其良好的在浓度低于78%硫酸中的耐腐蚀性为特点的。合金C94100在边界润滑条件下具有特别的优势。									
C93100	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[⑦,⑮]	6.5～8.5	2.0～5.0	2.0	1.0[⑨]	0.25	0.25Sb，0.05S，0.30P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93200	315，83-7-7-3，轴承青铜，（SAE660）	S，C，CL，PM，I，P	810～85.0[⑦,⑮]	6.3～7.5	6.0～8.0	1.0～4.0	1.0[⑨]	0.20	0.35Sb，0.08S，0.15P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93400	311，84-8-8-0	S，C，CL，PM，I，P	82.0～85.0[⑦,⑮]	7.0～9.0	7.0～9.0	0.8	1.0[⑨]	0.20	0.50Sb，0.08S，0.50P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93500	326，85-5-9-1，（SAE66）	S，C，CL，PM，I，P	83.0～86.0[⑦,⑮]	4.3～6.0	8.0～10.0	2.0	1.0[⑨]	0.20	0.30Sb，0.08S，0.05P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93600	—	S，C，CL，PM，I，P	79.0～83.0[⑧]	6.0～8.0	11.0～13.0	1.0	1.0[⑨]	0.20	0.55Sb，0.08S，0.15P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93700	305，80-10-10，衬套与轴承青铜（SAE 64）	S，C，CL，PM，I，P	78.0～82.0[⑮]	9.0～11.0	8.0～11.0	0.8	0.50[⑨]	0.7[⑰]	0.50Sb，0.08S，0.10P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93720	—	S，C，CL，PM，I，P	83.0最小[⑮]	3.5～4.5	7.0～9.0	4.0	0.50[⑨]	0.7	0.50Sb，0.10P[⑩]
C93800	319，78-7-15，耐酸铜，（SAE67）	S，C，CL，PM，I，P	75.0～79.0[⑮]	6.3～7.5	13.0～16.0	0.8	1.0[⑨]	0.15	0.8Sb，0.08S，0.05P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C93900	79-6-15	S，C，CL，PM，I，P	76.5～79.5[⑱]	5.0～7.0	14.0～18.0	1.5	0.8[⑨]	0.40	0.50Sb，0.08S，1.5P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C94000	—	S，C，CL，PM，I，P	69.0～72.0[⑲]	12.0～14.0	14.0～16.0	0.50	0.50～1.0[⑨]	0.25	0.50Sb，0.08S[⑳]，0.05P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C94100	—	S，C，CL，PM，I，P	72.0～79.0[⑲]	4.5～6.5	18.0～22.0	1.0	10[⑨]	0.25	0.8Sb，0.08S[⑳]，0.05 P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C94300	—	S，C，CL，PM，I，P	67.0～72.0[⑮]	4.5～6.0	23.0～27.0	0.8	10[⑨]	0.15	0.80Sb，0.08S[⑳]，0.08P[⑩]，0.005Al，0.005Si
C94310	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[⑮]	1.50～3.0	27.0～34.0	0.50	0.25～10[⑨]	0.50	0.50Sb，0.05P[⑩]

（续）

UNS 编号	其他代号，描述性名称（前 SAE 编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数,%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-锡-铅合金（高铅锡青铜）：最常用于轴承合金，常见于在中至高速运转的轴承里，如在电动机和电器里。合金 C93200 被认为是其中的一种重载合金。合金 C93600 的切削性能和抗咬死的能力得到改善。C93800 是以其良好的在浓度低于 78% 硫酸中的耐腐蚀性为特点的。合金 C94100 在边界润滑条件下具有特别的优势。									
C94320	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[15]	4.0 ~ 7.0	24.0 ~ 32.0	—	—	0.35	—
C94330	—	S，C，CL，PM，I，P	68.5 ~ 75.5[15]	3.0 ~ 4.0	21.0 ~ 25.0	3.0	0.50[9]	0.7	0.50Sb，0.10P[10]
C94400	312，81-8-11，磷青铜	S，C，CL，PM，I，P	余量[15]	7.0 ~ 9.0	9.0 ~ 12.0	0.8	1.0[9]	0.15	0.8Sb，0.08S，0.50P[10]，0.005Al，0.005Si
C94500	321，73-7-20，中青铜	S，C，CL，PM，I，P	余量[15]	6.0 ~ 8.0	16.0 ~ 22.0	1.2	1.0[9]	0.15	0.80Sb，0.08S，0.05P，0.005Al，0.005Si
铜-锡-镍合金（镍锡青铜）：高强度的结构铸件。易于铸造，有压力致密性。耐腐蚀和耐磨性。C94700 可热处理。合金适用于轴承、蜗轮、阀杆和螺母、螺旋桨、传送螺杆、滚子轴承的保持架和电气化机车硬件。									
C94700	88-5-0-2-5	S，C，CL，PM，I，P	85.0 ~ 90.0[19]	4.5 ~ 6.0	0.10[21]	1.0 ~ 2.5	4.5 ~ 6.0[9]	0.25	0.15Sb，0.20Mn，0.05S，0.05P，0.005Al，0.005Si
C94800	87-5-1-2-5，含铅镍锡青铜	S，C，CL，PM，I，P	84.0 ~ 89.0[19]	4.5 ~ 6.0	0.30 ~ 1.0	1.0 ~ 2.5	4.5 ~ 6.0[9]	0.25	0.15Sb，0.20Mn，0.05S，0.05P，0.005Al，0.005Si
C94900	含铅镍锡青铜	S，C，CL，PM，I，P	79.0 ~ 81.0[16]	4.0 ~ 6.0[9]	4.0 ~ 6.0	4.0 ~ 6.0	4.0 ~ 6.0[9]	0.30	0.25Sb，0.10Mn，0.08S，0.05P，0.005Al，0.005Si
铜-铝-铁和铜-铝-铁-镍合金（铝青铜）：铝青铜的特点是高强度和优异的耐腐蚀性。超过 9.5% Al 的合金可以进行热处理，其抗拉强度超过 120ksi（827MPa）。用途包括各种能承受重载的机件和构件，包括齿轮、蜗轮、气门导管和阀座。作为优异的重载轴承合金一般应当与经硬化的钢轴配对使用，但不能承受不同轴或润滑剂污染情况，而且轴承和轴都得加工到很高的表面粗糙度。									
C95200	415，88-3-9，铝青铜 9A，（SAE68a）	S，C，CL，PM，I，P	86.0 最低[15]	—	—	—	—	2.5 ~ 4.0	8.5 ~ 9.5Al
C95210	—	S，C，CL，PM，I，P	86.0 最低[15]	0.10	0.05	0.50	1.0[9]	2.5 ~ 4.0	8.5 ~ 9.5Al，1.0Mn，0.05Mg，0.25Si
C95220	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[4]	—	—	—	2.5[9]	2.5 ~ 4.0	9.5 ~ 10.5Al，0.50Mn
C95300	415，89-1-10，铝青铜 9B，（SAE68b）	S，C，CL，PM，I，P	83.0 最低[15]	—	—	—	—	0.8 ~ 1.5	9.0 ~ 11.0Al

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数,%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-铝-铁和铜-铝-铁-镍合金(铝青铜)：铝青铜的特点是高强度和优异的耐腐蚀性。超过9.5%Al的合金可以进行热处理，其抗拉强度超过120ksi(827MPa)。用途包括各种能承受重载的机件和构件，包括齿轮、蜗轮、气门导管和阀座。作为优异的重载轴承合金一般应当与经硬化的钢轴配对使用，但不能承受不同轴或润滑剂污染情况，而且轴承和轴都得加工到很高的表面粗糙度。									
C95400	415，85-4-11，铝青铜9C	S，C，CL，PM，I，P	83.0最低[4]	—	—	—	1.5[9]	3.0~5.0	10.0~11.5Al，0.50Mn
C95410	—	S，C，CL，PM，I，P	83.0最低[4]	—	—	—	1.5~2.5[9]	3.0~5.0	10.0~11.5Al，0.50Mn
C95420	—	S，C，CL，PM，I，P	83.5最低[4]	—	—	—	0.50[9]	3.0~4.3	10.5~12.0Al，0.50Mn
C95500	415，81-4-11，铝青铜9D	S，C，CL，PM，I，P	78.0最低[4]	—	—	—	3.0~5.5[9]	3.0~5.0	10.0~11.5Al，3.5Mn
C95510	镍-铝青铜	S，C，CL，PM，I，P	78.0最低[22]	0.20	—	0.30	4.5~5.5[9]	2.0~3.5	9.7~10.9Al，1.5Mn
C95520	镍-铝青铜	S，C，CL，PM，I，P	74.5最低[4]	0.25	0.30	0.30	4.2~6.0[9]	4.0~5.5	10.5~11.5Al，1.5Mn，0.15Si，0.20Co，0.05Cr
C95600	91-2-7，铝-硅青铜	S，C，CL，PM，I，P	88.0最低[15]	—	—	—	0.25[9]	—	6.0~8.0Al，1.8~3.2Si
C95700	75-3-8-2-12，锰-铝青铜	S，C，CL，PM，I，P	71.0最低[4]	—	—	—	1.5~3.0[9]	2.0~4.0	7.0~8.5Al，11.0~14.0Mn，0.10Si
C95710	锰-铝青铜	S，C，CL，PM，I，P	71.0最低[4]	1.0	0.05	0.50	1.5~3.0[9]	2.0~4.0	7.0~8.5Al，11.0~14.0Mn，0.15Si，0.05P
C95800	415，81-5-4-9-1，α镍-铝青铜，螺旋桨青铜	S，C，CL，PM，I，P	79.0最低[4]	—	0.03	—	4.0~5.0[9,23]	3.5~4.5[23]	8.5~9.5Al，0.8~1.5Mn，0.10Si
C95810	镍-铝青铜	S，C，CL，PM，I，P	79.0最低[4]	—	0.10	0.50	4.0~5.0[9,23]	3.5~4.5[23]	8.5~9.5Al，0.8~1.5Mn，0.05Mg，0.10Si
C95900	—	S，C，CL，PM，I，P	余量[4]	—	—	—	0.50[9]	3.0~5.0	12.0~13.5Al，1.5Mn
铜-镍-铁合金(铜-镍)。优异的耐腐蚀性，特别在海水里。具有从低温到高温中的高强度和高韧性。非常广泛地应用于船舰用途、如泵和阀的零件、配件和法兰等。含铍合金经热处理可以达到110ksi(758MPa)左右。									
C96200	90-10铜-镍合金	S，C，CL，PM，I，P	余量[4]	—	0.01	—	9.0~11.0[9]	1.0~1.8	1.5Mn，0.50Si，0.5~1.0Nb，0.10C，0.02S，0.02P

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺[1]	成分[2]（质量分数，%） Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-镍-铁合金（铜-镍）。优异的耐腐蚀性，特别在海水里。具有从低温到高温中的高强度和高韧性。非常广泛地应用于船舰用途、如泵和阀的零件、配件和法兰等。含铍合金经热处理可以达到110ksi(758MPa)左右。									
C96300	80-20铜-镍合金	S, C, CL, PM, I, P	余量[4]	—	0.01	—	18.0~22.0[9]	0.50~1.5	0.25~1.5Mn, 0.50Si, 0.50~1.5Nb, 0.15C, 0.02S, 0.02P
C96400	70-30铜-镍合金	S, C, CL, PM, I, P	余量[4]	—	0.01	—	28.0~32.0[9]	0.25~1.5	1.5Mn, 0.50Si, 0.50~1.5Nb, 0.15C, 0.02S, 0.02P
C96600	717C，铍铜-镍合金	S, C, CL, PM, I, P	余量[4]	—	0.01	—	29.0~33.0[9]	0.8~1.1	1.0Mn, 0.15Si, 0.40~0.7Be
C96700	铍-锆-钛铜镍合金	S, C, CL, PM, I, P	余量[4]	—	0.01	—	29.0~33.0[9]	0.40~0.70	0.40~0.70Mn, 0.15Si, 1.1~1.2Be, 0.15~0.35Zr, 0.15~0.35Ti
C96800	旋节合金	S, C, CL, PM, I, P	余量[4]	—	0.005	—	9.5~10.5[9]	0.50	0.05~0.30Mn, 0.05Si, 0.10~0.30Nb[24]
C96900	旋节合金	S, C, CL, PM, I, P	余量[4]	7.5~8.5	0.02	0.50	14.5~15.5[9]	0.50	0.05~0.30Mn, 0.10Nb, 0.15Mg
铜-镍-锌合金（锌白铜）：中等强度，具有良好的耐腐蚀性和悦目的银白色。适用于阀、配件和其他用于乳制品设备的零件以及作为建筑和装潢饰件。									
C97300	56-2-10-20-12，12%锌白铜	S, C, CL, PM, I, P	53.0~58.0[15]	1.5~3.0	8.0~11.0	17.0~25.0	11.0~14.0[9]	1.5	0.35Sb, 0.08S, 0.05P, 0.005Al, 0.50Mn, 0.15Si
C97400	59-3-5-17-16，15%锌白铜	S, C, CL, PM, I, P	58.0~61.0[15]	2.5~3.5	4.5~5.5	余量	15.5~17.0[9]	1.5	0.50Mn
C97600	64-4-4-8-20，20%锌白铜，戴利金属	S, C, CL, PM, I, P	63.0~67.0[25]	3.5~4.5	3.0~5.0	3.0~9.0	19.0~21.5[9]	1.5	0.25Sb, 0.08S, 0.05P, 0.005Al, 1.0Mn, 0.15Si
C97800	66-5-2-2-25，25%锌白铜	S, C, CL, PM, I, P	64.0~67.0[26]	4.0~5.5	1.0~2.5	1.0~4.0	24.0~27.0[9]	1.5	0.20Sb, 0.08S, 0.05P, 0.005Al, 1.0Mn, 0.15Si
铜-铅合金（含铅铜）：用于特殊用途轴承的超高含铅合金。合金的强度相对较低，耐冲击性较差，一般需要增强。									
C98200	含铅铜，25%SAE49	S, C	余量[4]	0.6~2	21.0~27.0	0.50	0.50	0.7	0.10P, 0.50Sb
C98400	含铅铜，30%	S, C	余量[4]	0.50	26.0~33.0	0.50	0.50	0.7	1.5Ag, 0.10P, 0.50Sb
C98600	含铅铜，35%SAE480	S, C	60.0~70.0	0.50	30.0~40.0	—	—	0.35	1.5Ag

（续）

UNS编号	其他代号，描述性名称（前SAE编号）	可采用的铸造工艺①	成分②（质量分数，%）						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	其他
铜-铅合金（含铅铜）：用于特殊用途轴承的超高含铅合金。合金的强度相对较低，耐冲击性较差，一般需要增强。									
C98800	含铅铜，40% SAE481	S，C	56.5~62.5⑤	0.25	37.5~42.5㉗	0.10	—	0.35	5.5Ag㉗，0.02P
C98820	含铅铜，42% SAE484	S，C	余量	1.0~5.0	40.0~44.0	—	—	0.35	—
C98840	含铅铜，50% SAE485	S，C	余量	1.0~5.0	44.0~58.0	—	—	0.35	—
特种合金：合金专门用于制造玻璃的模具，也能用于船用硬件。									
C99300	Incramet 800	S，C，CL	余量㉕	0.05	0.02	—	13.5~16.5	0.40~1.0	10.7~11.5Al，1.0~2.0Co，0.02Si
C99350	铜镍铝锌合金	S，C，CL	余量㉕	—	0.15	7.5~9.5	14.5~16.0⑨	1.0	9.5~10.5Al，0.25Mn
特种合金：具有中等强度的合金，并由良好的抗脱锌和脱铝性。适合用于船用（尤其是甲板上的）和矿山设备上的各种不同产品。									
C99400	非脱锌合金，NDZ	S，C，CL，I，P	余量㉖	—	0.25	0.50~5.0	1.0~3.5	1.0~3.0	0.50~2.0Al，0.50~2.0Si，0.50Mn
C99500	铜-镍-铝-锌-铁合金	S，C，CL	余量㉖	—	0.25	0.50~2.0	3.5~5.5	3.0~5.0	0.50~2.0Al，0.50~2.0Si，0.50Mn
特种合金：用于要求特高缓冲能力的特种用途上的合金。									
C99600	Incramutel	S，C，CL	余量㉖	0.10	0.02	0.20	0.20	0.20	1.0 ~ 2.8Al，0.20Co，0.10Si，39.0~45.0Mn，0.05C
C99700	白锰黄铜	S，CL，PM，I，P，D	54.0最低㉖	1.0	2.0	19.0~25.0	4.0~6.0	1.0	0.50~3.0Al，11.0~15.0Mn
C99750	铜-锌-锰合金	S，PM，I，P，D	55.0~61.0㉖	0.50~2.5	—	17.0~23.0	5.0	1.0	0.25~3.0Al，17.0~23.0Mn

①铸造工艺：S，砂型铸造；D，压铸铸造；C，连铸；I，熔模铸造；PM，金属型铸造；CL，离心铸造；P，石膏铸造。　②所列成分值均为最大百分比，除标明为一个范围或最小值的。　③包括Ag，最小。　④Cu+所标明元素含量的总和，99.5%最小。　⑤包括Ag。　⑥Ni+Co。　⑦当确定铜的最小含量时，铜按Cu+Ni计算。　⑧Cu+所标明元素含量的总和，99.3%最小。　⑨包括Co。　⑩对于连铸，P为1.5%最大。　⑪Fe+Sb+As为0.5%最大。　⑫Cu+所标明元素含量的总和为99.2%最小。　⑬Fe+Sb+As为0.8%最大。　⑭Cu+所标明元素含量的总和为99.1%最小。　⑮Cu+所标明元素含量的总和为99.0%最小。　⑯Cu+所标明元素含量的总和为99.4%最小。　⑰当作为支承钢基轴承时，Fe为0.35%最大。　⑱Cu+所标明元素含量的总和为99.9%最小。　⑲Cu+所标明元素含量的总和为98.7%最小。　⑳对于连铸，S为0.25%最大。　㉑如果铅含量超过0.01%，C94700（经热处理）的力学性能则可能达不到。　㉒Cu+所标明元素含量的总和为99.8%最小。　㉓Fe含量不得超过Ni含量。　㉔应按以下杂质的极限含量：0.10%Al、0.001%B、0.001%Bi、0.005%~0.15%Mg、0.005%P、0.0025%S、0.02%Sb、7.5%~8.5%Sn、0.01%Ti和1.0%Zn。　㉕Cu+所标明元素含量的总和为99.7%最小。　㉖Cu+所标明元素含量的总和为99.6%最小。　㉗通过调整Pb和Ag含量改善合金的硬度。

引自铜业发展协会。

铸造铜合金

铸造铜合金一般与其对应的锻压铜合金是相似的，但还是有自身独特的成分/性能特征。例如它们确实提供了加入铅含量达25%的可能性，但是对于锻压技术来说这是不容易实现的，而提供这样的成分对于通过铅颗粒的弥散来防止在轴承应用中发生拉伤是十分有用的。铸造铜合金的应用在于利用它们的耐腐蚀性和高热、电的传导性。最普通的合金就是用于一般用途如阀门和管路配件的Cu-5Sn-5Pb-5Zn合金(C83600)，以及广泛应用于铸造管道系统零件的C84400。含有弥散在单相基体里的铅颗粒的C83600具有良好的切削性能及中等程度的耐腐蚀性、抗拉强度(240MPa或35ksi)、塑性和传导性(15%IACS)。

然而Cu-Sn-Pb-(和/或Zn)铸造合金仅有中等的强度，铸造锰和铝青铜具有较高的抗拉强度450~900MPa(65~130ksi)。就像锻压合金一样，铸造铝青铜合金通常有铁(0.8%~5.0%)的加入，以此为晶粒的细化和强度的增加提供富铁颗粒。此外，含铝量范围为9.5%~10.5%(或8.0%~9.5% Al+镍或锰的加入)的合金可以通过热处理来提高其强度。鉴于铸件的截面厚度、冷却速度以及合金成分和热处理，其显微组织是相当复杂的。铝青铜可以在β区进行完全或部分退火和淬火形成含有针状α的β马氏体。这种合金在时效时利用细针状α的析出实现马氏体的回火。例如作为一种铝青铜合金，Cu-10.5Al-5Fe-5Ni在应用中具有高强度与良好耐腐蚀性的综合优势。通过热处理具有复杂成分的(铁、镍、铜)铝和CsCl晶体组织的金属间κ-相能提供任何形态的强化组分：像球状颗粒、细析出物，或成为网状共析晶团中的一种组分。

表3.2-8列出铸造铜合金的化学成分、应用和特征。其他有关内容包括力学性能可以参阅本章第4节。

精选参考文献

从铜业发展协会颁布的资料里，可以找到有关铜及其合金更有用的信息。其中特别重要的是《锻压和铸造的铜及铜合金的标准手册》，其目录如下：

- 第一部分　公差(锻轧产品)；
- 第二部分　合金数据(锻轧产品)；
- 第三部分　术语；
- 第四部分　工程数据；
- 第五部分　货源(锻轧产品)；
- 第六部分　技术标准索引(锻轧和铸造产品)；
- 第七部分　合金数据(铸造产品)。

除第五、六部分合为一册外，其他各部分单独成册。

除了《ASM手册》各卷中所包含的有关铜和铜合金的性能及工艺的详尽综述外，还应参阅下列参考文献：

- G. Joseph and K.J.A. Kundig, *Copper: Its Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status*, ASM International and International Copper Association, Ltd., 1998.
- E.G. West, *Copper and Its Alloys*, Ellis Horwood Ltd., 1982.
- C.R. Brooks, Copper-Base Alloys, in *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, American Society for Metals, 1982, p 275–327.
- J.H. Mendenhall, Ed., *Understanding Copper Alloys*, Olin Corporation, East Alton, IL, 1977.

第2节 铜管制品

铜或铜合金的管材和管道广泛地应用于楼宇和家中饮用水的输送。这种产品也应用于所有石油、化工和制造业，用于输送从天然水和处理水、海水到浓度范围极大的有机和无机的各种化学物质流体。在汽车和航空工业中，铜管用于液压管线、换热器(如汽车散热器)、空调系统以及不同形式的成形或切削加工的配件。在船舶用途中，铜管材及其管线用于输送饮用水、海水和其他流体，但其主要用途还是作为排管用于冷凝汽器、节热器和辅助换热器。铜管材及其管线在食品和饮料工业中为甜菜和甘蔗的制糖、啤酒的酿造以及其他食品的处理工序输送工艺流体。在建筑业里，铜管广泛用于民宅、商场、工厂车间以及办公室里的取暖和空调系统。表3.2-9概括了所选用的标准管材合金的铜合金，并列出了每一种合金的ASTM技术标准及其典型的用途。

表3.2-9　铜管材合金及其典型用途

UNS编号	合金类别	ASTM技术标准	典型用途
C10200	无氧铜	B68, B75, B88, B111, B188, B280, B359, B372, B395, B447	母线筒、导体、波导管

(续)

UNS 编号	合金类别	ASTM 技术标准	典型用途
C12200	磷脱氧铜	B68，B75，B88，B111，B280，B306，B359，B360，B395，B447，B543	水管，冷凝器、蒸发器和换热器，空调和冰箱、气和油燃烧炉管道，卫浴管道和蒸汽管，酿造和蒸馏管，汽油、液压油和润滑油管，旋转头
C19200	铜	B111，B359，B395，B469	汽车液力制动管、柔性软管
C23000	红铜，85%	B111，B135，B359，B395，B543	冷凝器和换热器管、柔性软管、卫浴管道、泵用管道
C26000	弹壳铜	B135	黄铜水管件
C33000	低铅黄铜(管)	B135	垂直和动力液压缸、黄铜管件
C36000	易切削黄铜	—	螺纹机件、管件
C43500	锡黄铜	—	弹簧管、乐器
C44300，C44400，C44500	防腐蚀海军铜	B111，B359，B395	冷凝器、蒸发器和换热器管、蒸馏器管
C46400，C46500，C46600 和 C46700	海军铜	—	船舶硬件、螺母
C60800	铝青铜，5%	B111，B359，B395	冷凝器、蒸发器和换热器管、蒸馏器管
C65100	硅青铜 B	B315	换热器管、电缆导管
C65500	硅青铜 A	B315	化学设备、换热器管，活塞环
C68700	含砷铝黄铜	B111，B359，B395	冷凝器、蒸发器和换热器管、蒸馏器管
C70600	含镍铜，10%	B111，B359，B395，B466，B467，B543，B552	冷凝器、蒸发器和换热器管、海水管道、蒸馏器管
C71500	含镍铜，30%	B111，B359，B395，B466，B467，B543，B552	冷凝器、蒸发器和换热器管、海水管道、蒸馏器管

耐腐蚀性往往是为某一特定的用途选择一种管材合金的关键因素。本章第7节的有关内容将有助于为特定的用途确定最适用的合金。

连接。可以用不同的方法连接铜管管材和管道。永久性连接可以采用硬钎焊和焊接。半永久性连接最常用的是软钎焊，通常使用标准插座式软钎焊附件进行连接，但是管道的螺纹连接也可看成是一种半永久性连接。可拆卸的连接几乎都采用某种机械连接的方式——扩口连接、法兰盘-垫片连接以及专门设计的各种压配合都很普通。

管材的性能。与大部分的锻造产品一样，铜管材的力学性能取决于所采用的工艺。对于铜生产管材的方法并不很多，但是其形成的冶金学状态确实与性能有最大的关系。表3.2-10总结了所列的管材合金在其最常用状态下的拉伸性能。

表 3.2-10 铜合金管材的一般力学性能

状态	抗拉强度		屈服强度①		伸长率②(%)	状态	抗拉强度		屈服强度①		伸长率②(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi	
C10200						**C10200**					
OS050	220	32	69	10	45	H55	275	40	220	32	25
OS025	235	34	76	11	45	H80	380	55	345	50	8

（续）

状　态	抗拉强度		屈服强度①		伸长率②（%）
	MPa	ksi	MPa	ksi	
C12200					
OS050	220	32	69	10	45
OS025	235	34	76	11	45
H55	275	40	220	32	25
H80	380	55	345	50	8
C19200					
H55③	290	42	205④	30④	35
C23000					
OS050	275	40	83	12	55
OS015	305	44	125	18	45
H55	345	50	275	40	30
H80	485	70	400	58	8
C26000					
OS050	325	47	105	15	65
OS025	360	52	140	20	55
H80	540	78	440	64	8
C33000					
OS050	325	47	105	15	60
OS025	360	52	140	20	50
H80	515	75	415	60	7
C43500					
OS035	315	46	110	16	46
C43500					
H80	515	75	415	60	10
C44300，C44400，C44500					
OS025	365	53	150	22	65
C46400，C46500，C46600，C46700⑤					
H80	605	88	455	66	18
C60800					
OS025	415	60	185	27	55
C65100					
OS015	310	45	140	20	55
H80	450	65	275	40	20
C65500					
OS050	395	57	—	—	70
H80	640	93	—	—	22
C68700					
OS025	415	60	185	27	55
C70600					
OS025	305	44	110	16	42
H55	415	60	395	57	10
C71500					
OS025	415	60	170	25	45

注：管尺寸：25mm(1in)外径×1.65mm(0.065in)壁厚。

①在载荷作用下，0.5%的延伸。　②50mm(2in)。　③管尺寸：4.8mm(0.1875in)外径×0.76mm(0.030in)壁厚。

④0.2%条件屈服强度。　⑤管尺寸：9.5mm(0.375in)外径×2.5mm(0.097in)壁厚。

管壳的生产

铜管产品一般用铜坯的挤制或穿孔进行生产。

挤制。铜和铜合金管壳的挤制是先将坯料加热到再结晶温度以上，然后迫使材料穿过一个拉模上的小孔并套越位于拉模上小孔中的心轴。心轴与拉模之间的间隙就决定了挤制管壳的壁厚。

挤制时，拉模置于挤出机的储料器部分的一端，利用压头将金属挤制穿过拉模，压头从拉模的另一端对准储料器的中心。管壳的生产可以用中空的坯料开始或者分为两步进行，即先穿孔再挤制。

挤制压力随合金的成分而异，C36000(61.5Cu-3Pb-35.5Zn)要求相对较低的压力，而C26000(70Cu-30Zn)和C44300(71.5Cu-1Sn-27.5Zn-0.06As)在所有的黄铜中要求最大的压力。大部分的铜要求的压力则介乎C26000和C36000所要求的之间。C71500(70Cu-30Ni)要求非常高的挤制压力。积压压力也取决于坯料的温度、挤制比(坯料与挤制后的横截面面积之比)、挤制速度和润滑的情况。在挤制过程中，金属的流动取决于许多因素，包括金属的铜含量、润滑剂的用量以及模具的设计。

旋转穿孔。在曼内斯曼式穿孔机(Mannesmann mill,带桶形轧辊的穿孔机)上旋转穿孔是另一种常用的用铜和某些铜合金生产无缝管材和管道的方法。穿

孔通常是用于金属的一种最为严酷的成形工序。这种工艺具有当坯料的周边承受压缩力时，在其中心引起拉应力的优点。在旋转穿孔中，经加热的圆柱形坯料一端被送进两个旋转加工轧辊间，轧辊在一个水平面内与坯料的轴线倾斜成一个角度(见图3.2-6)。位于坯料下面的导辊用于防止坯料从两个工作轧辊间掉落。因为工作轧辊是以它们相互间并相对于坯料均成一定的角度而安装的，所以坯料在旋转的同时被顶向安置在工作轧辊之间的穿孔顶头。

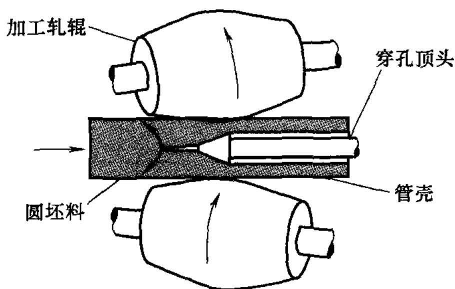


图3.2-6 金属穿孔的示意图。箭头所指为旋转方向

加工轧辊的开度要小于坯料，沿周边作用于坯料的压力使正处于穿孔顶头前沿的坯料中心开启一条拉伸裂纹，随后扩张成为粗糙的圆孔。穿空顶头使坯料中心的轴线孔不断向前扩进，并使孔壁光滑和控制成形管的壁厚。

铜和普通的α黄铜只要含铅量掌握在低于0.01%就都能进行穿孔。α-β黄铜的含铅量可以更高一些而不至于对其被穿孔能力产生负面影响。

当用黄铜穿孔时，必须严格维持其温度，因为黄铜能穿孔的温度范围是很窄的。每一种合金都有适合其进行穿孔所需有效塑性的特征性温度范围。低于此范围，在圆周力的作用下，中心孔则无法很好地开启。而过热将会导致表面开裂。下表给出不同合金的推荐穿孔温度：

UNS 编号	穿孔温度	
	℃	℉
C11000	815～870	1500～1600
C12200	815～870	1500～1600
C22000	815～870	1500～1600
C23000	815～870	1500～1600
C26000	760～790	1400～1450
C28000	705～760	1300～1400
C46400	730～790	1350～1450

成品管材的生产

焊接管。这是用清洁的冷轧或退火状态的带材制成的。带材在精密成形机上成形为管状。

对于锻-焊管材，通常用高频电流将带材的边缘加热到所要求的焊接温度，然后通过压形使之密合在一起，造成一种锻造型的连接，其内外会形成飞边或焊滴。外部的飞边必须去除，以此获得光滑的外表面。内部的飞边也要通过修整清理予以去除，以此获得光滑、干净的内表面。

对于熔焊管，将带材的边缘对齐在一起并通常使用气体保护钨极弧焊工艺焊接，它不用金属焊条形成一种熔合型的连接，故没有内、外的飞边或焊滴。

焊接管可以焊接状态直接使用，或焊接后进一步进行冷拉、压缩和退火处理。

冷拉。一般铜在拉丝卷筒而黄铜和其他合金在拉伸机上，将经挤压或穿孔的管壳冷拉成为较小尺寸。无论用何种机器都是金属的冷变形加工，将管子从一个压缩直径的拉模中拔出。将管子拔过一个固定或浮动的顶头或心轴的同时，其壁厚被减小。冷拉能提高材料的强度，并同时降低其塑性。经过拔制，管子的尺寸减小——外径、内径、壁厚以及截面面积全都减小。因为金属的加工硬化，管子可以在拉至小尺寸的中间阶段进行退火。而铜的塑性非常好，将其拉至成品尺寸都不用退火。

管子压制。这是冷精压管材的又一种工艺方法。在管材压制中，半圆形的沟槽模滚旋转或沿管子前后摆动，而管子内部的锥形心轴用于控制器内径和壁厚。这种工艺所生产的管子有非常高的尺寸精度，并且能得到比冷拉更高的同轴度。

管压模的沟槽带有锥度，沟槽的一端比所要精压管子的外径稍大一些。当模滚摆动时，向管子压入锥形的心轴，以此减小壁厚并增加管子的长度。管子沿纵向进给并绕其轴线旋转，以此沿其圆周均匀分布其冷变形加工。进给和旋转与模滚的运动同步进行，并且发生在模滚完成其向前的行程之后。

管子压制可以应用于所有能在拉伸机上拔制的合金。为适应不同的合金只需在设计和操作条件上略作改变。在压制后再用拉丝卷筒或拉伸机进行拉制就可以生产得到小直径管子。

产品技术标准

铜的管材和管道可以具有很大不同的名义直径和壁厚，从小直径的毛细管到300mm(12in)公称直径的

管道。铜管的尺寸和公差在一定程度上取决于它们所要应用的类型。在表3.2-11所列就是铜管在若干种用途里的ASTM技术标准，以及管制品的一些其他要求。汽车上用的无缝铜管(名义直径为⅛～¾in)技术标准由SAE J528规定。应用于冷凝器、换热器、节热器及类似的无燃压力容器所应用的铜制管材和管道也都包含在表3.2-11所列的ASTM技术标准里(ASME材料的技术标准同与之编号相同的ASTM的技术标准几乎是一致的,如ASME SB111与ASTM B111是一致的)。某些合金管材包含在AMS的技术标准里，它适用于航空用途。典型的例子包括：

AMS技术标准	产　品	铜合金
4555	无缝黄铜管，轻度退火	C26000、C33000
4558	无缝拔制黄铜管	C33200
4625	磷青铜，硬状态	C51000
4640	铝青铜	C63000
4665	无缝硅青铜管，退火	C65500

表3.2-11　铜管材和管道的ASTM和ASME技术标准

管制产品	ASTM	ASME
无缝管材和管道		
铜合金(C69100)无缝管材和管道	B706	—
铜镍合金无缝管材和管道①	B466，B466M①	SB466
铜硅合金无缝管材和管道	B315	SB315
用于导电体的无缝管材和管道	B188	—
无缝管道，标准尺寸	B42	SB42
无缝红铜　管道，标准尺寸	B43	SB43
无缝管道，无螺纹	B302	—
无缝管材		
无缝铜合金管材(C19200和C70600)，压力用途	B469	—
无缝铜镍管材，用于脱盐工厂	B552	—
无缝管材①	B75	SB75
	B75M①	—
无缝管材，黄铜①	B135	SB135
	B135M①	—
无缝管材，轻度退火①	B68	—
	B68M①	—
无缝管材，毛细管，硬拔	B360	—
无缝管材，冷凝器和换热器①	B111，B395	SB 111，SB395
	B111M①	—
	B395M①	—
无缝管材，冷凝器和换热器，带有整体散热片①	B359	SB359
	B359M①	—
无缝管材，用于空调和冰箱用途	B280	—
无缝管材，用于排水	B306	—
无缝管材，一般要求①	B251	—
	B251M①	—
无缝管材，矩形波导管	B372	—

（续）

管制产品	ASTM	ASME
无缝管材		
无缝管材，水①	B88	—
	B88M①	—
焊接管道和管材		
焊接铜合金管道	B608	SB467
硬状态焊接铜管材(C21000)，用于一般管工和流体输送	B642	—
焊接黄铜管材，一般用途	B587	—
焊接铜管材，用于空调和冰箱用途	B640	—
焊接管道和管材，铜镍合金	B467	SB467
焊接管材，C10800 和 12000①	B543	SB543
	B543M①	—
焊接管材，所有其他铜	B447	—

①词头“M”表示公制技术标准。

有关铜制产品的其他技术标准信息可查阅《锻造和铸造的铜及铜合金的标准手册》(第六部分，技术标准索引)，铜业发展协会出版。

第3节　铜丝和铜缆

从大约公元前2000到3000年就开始用铜和铜合金制造铜丝。考古发现，古代的亚述人、巴比伦人和埃及人已经熟练地生产铜丝并应用于装饰上。通过拉模拔丝是非常现代的生产方式。在中世纪拉丝工艺的发展在很大程度上用于拉制铁丝和钢丝，并将其用于销子和琴弦。但随着1847年电报的发明，开始需要有连续的很长长度的用铜制成的线材。1850年，铜丝被用于制造连接英国和法国的海底电缆。

在20世纪初，线材还是通过单一的拉模进行拉制——即普通所谓的“拉丝机”的拉制工艺。拉模就是由在钢板上冲出一系列的孔而制成的。

大约在1900年，推出多重拉丝机。为此，激冷铸铁板和拉模可以通过铰孔达到尺寸，以此替代冲孔到尺寸的钢板拉模。由于在线材与拉丝绞盘之间的摩擦所产生的热量，以及为了通过逐级减小的拉模成功地进行压缩，故必须使用润滑剂。而且润滑剂的使用又加快了拉丝的进程。

20世纪20年代，拉丝技术的主要发展就是用碳化钨制造的拉模投入使用。高硬度和低孔隙度的碳化钨更适合高速拉丝。如今碳化钨拉模已形成标准。非常细的线材尺寸，即低于近1.6mm(0.064in)要使用金刚石的拉模。

铜导体的分类

用于导电体的铜金属分成三大类：高电导率铜、高铜合金和电工青铜。

高电导率铜的ASTM的技术标准包括B4、B5、B170、B442和B623。ASTM B4适用于高电阻湖铜和低电阻湖铜。湖铜是用苏必利尔湖(Lake Superior)当地的矿藏经过火精炼得到的一种铜。ASTM B5适用于包括用粗铜、转炉铜或湖铜通过电解精炼所得到的铜。ASTM B170所适用的是无氧电工铜。

一些特种铜是通过加少量的硬化剂(如铬、碲、铍、镉或锆)生产而得到的。它们应用于要求具有高退火抗力的用途。

还有一系列开发为导体使用的青铜，这些合金包括在ASTM B105里。这些青铜具有比标准导体铜更佳的耐腐蚀性和更高的抗拉强度。

线材和缆材的分类

圆线材。ASTM B258规定了用于导电体的实心圆铜丝的标准名义直径和横截面面积。线材的尺寸几乎都是按照美国线规(AWG)系统规定的。该系统按照两种线材的尺寸(分别为4/0和36AWG)设定直径，并按直径的几何递增分为38个小于36AWG的中间规格(表3.2-12)。这是一种反向的系列即大数字表示较小的线材直径。AWG的每一档增加大约都相当于横截面面积的20.7%的缩小。

表3.2-12 按美国线规(AWG)系统的圆线材尺寸和退火实心铜线材的性质

导线尺寸，AWG	导线直径		导线面积，20℃(68 ℉)		退火铜(ASTM B3)			
	mm	in	mm^2	圆密耳	净重① kg/km	净重① ft/1000ft	伸长率②(%)	名义电阻值③ Ω/1000ft(305m)
4/0	11.684	0.4600	107.0	211600	953.2	640.5	35	0.0490
3/0	10.404	0.4096	85.0	167800	755.7	507.8	35	0.06180
2/0	9.266	0.3648	67.4	133100	599.4	402.8	35	0.07792
1/0	8.252	0.3249	53.5	105600	475.5	319.5	35	0.09821
1	7.348	0.2893	42.4	83690	377.0	253.3	30	0.1239
2	6.543	0.2576	33.6	66360	299.0	200.9	30	0.1563
3	5.827	0.2294	26.7	52620	237.1	159.3	30	0.1971
4	5.189	0.2043	21.2	41740	188.0	126.3	30	0.2485
5	4.620	0.1819	16.8	33090	149.1	100.2	30	0.3134
6	4.115	0.1620	13.3	26240	118.2	79.44	30	0.3952
7	3.665	0.1443	10.5	20820	93.8	63.03	30	0.4981
8	3.264	0.1285	8.37	16510	74.4	49.98	30	0.6281
9	2.906	0.1144	6.63	13090	59.0	39.62	30	0.7923
10	2.588	0.1019	5.26	10380	46.8	31.43	25	0.9992
11	2.304	0.0907	4.17	8230	37.1	24.9	25	1.26
12	2.052	0.0808	3.31	6530	29.5	19.8	25	1.59
13	1.829	0.0720	2.63	5180	23.4	15.7	25	2.00
14	1.628	0.0641	2.08	4110	18.5	12.4	25	2.52
15	1.450	0.0571	1.65	3260	14.7	9.87	25	3.18
16	1.290	0.0508	1.31	2580	11.6	7.81	25	4.02
17	1.151	0.0453	1.04	2050	9.24	6.21	25	5.06
18	1.024	0.0403	0.823	1620	7.32	4.92	25	6.40
19	0.912	0.0359	0.654	1290	5.80	3.90	25	8.04
20	0.813	0.0320	0.517	1020	4.61	3.10	25	10.2
21	0.724	0.0285	0.411	812	3.66	2.46	25	12.8
22	0.643	0.0253	0.324	640	2.89	1.94	25	16.2
23	0.574	0.0226	0.259	511	2.31	1.55	25	20.3
24	0.511	0.0201	0.205	404	1.82	1.22	20	25.7
25	0.455	0.0179	0.162	320	1.44	0.970	20	32.4
26	0.404	0.0159	0.128	253	1.14	0.765	20	41.0
27	0.361	0.0142	0.102	202	0.908	0.610	20	51.4

（续）

导线尺寸，AWG	导线直径		导线面积，20℃（68 ℉）		退火铜（ASTM B3）			
	mm	in	mm²	圆密耳	净重① kg/km	净重① ft/1000ft	伸长率②（%）	名义电阻值③ Ω/1000ft（305m）
28	0.320	0.0126	0.081	159	0.716	0.481	20	65.2
29	0.287	0.0113	0.065	128	0.576	0.387	20	81.0
30	0.254	0.0100	0.051	100	0.451	0.303	15	104.0
31	0.226	0.0089	0.040	79.2	0.357	0.240	15	131.0
32	0.203	0.0080	0.032	64.0	0.289	0.194	15	162.0
33	0.180	0.0071	0.026	50.4	0.228	0.153	15	206.0
34	0.160	0.0063	0.020	39.7	0.179	0.120	15	261.0
35	0.142	0.0056	0.016	31.4	0.141	0.0949	15	330.0
36	0.127	0.0050	0.013	25.0	0.113	0.0757	15	415.0
37	0.114	0.0045	0.010	20.2	0.0912	0.0613	15	513.0
38	0.102	0.0040	0.0081	16.0	0.0720	0.0484	15	648.0
39	0.089	0.0035	0.0062	12.2	0.0552	0.0371	15	850.0
40	0.079	0.0031	0.0049	9.61	0.0433	0.0291	15	1079.0
41	0.071	0.0028	0.0040	7.84	0.0353	0.0237	15④	1323.0
42	0.0635	0.0025	0.0032	6.25	0.0281	0.0189	15④	1659.0
43	0.056	0.0022	0.0023	4.48	0.0219	0.0147	15④	2143.0
44	0.050	0.0020	0.0020	4.00	0.0180	0.0121	15④	2593.0
45	0.045	0.00176	0.0016	3.10	0.0140	0.00938	④	3345.6
46	0.040	0.00157	0.00125	2.46	0.0111	0.00745	④	4216.0
47	0.036	0.00140	0.00099	1.96	0.00882	0.00593	④	5291.6
48	0.031	0.00124	0.00078	1.54	0.00673	0.00466	④	6734.7
49	0.028	0.00111	0.00062	1.23	0.00554	0.00372	④	8432.1
50	0.025	0.00099	0.00050	0.980	0.00442	0.00297	④	10583
51	0.022	0.00088	0.00039	0.774	0.00348	0.00234	④	13400
52	0.020	0.00078	0.00031	0.608	0.00274	0.00184	④	17058
53	0.018	0.00070	0.00025	0.490	0.00220	0.00148	④	21166
54	0.016	0.00062	0.00019	0.384	0.00173	0.00116	④	27009
55	0.014	0.00055	0.00015	0.302	0.00136	0.000914	④	34342
56	0.012	0.00049	0.0012	0.240	0.00108	0.000726	④	43214

①根据密度 8.89g/cm³，温度 20℃（68 ℉）。　②250mm（10in）的最小伸长率。　③根据电阻率 0.01724Ω · mm²/m（875 · 20Ω · lb/mil²），它是电导率按国际退火铜标准（IACS）的电阻率。　④伸长率按 ASTM B3 的规定。

电工上使用的硬拉铜线材和硬拉铜合金线材分别由 ASTM B1 和 B105 规定。ASTM B3 规定的是软（退火的）铜线材。表 3.2-12 和表 3.2-13 列出了 ASTM B1、B3 和 B105 所规定的线材尺寸和性能。

表3.2-13　硬拉铜和铜合金圆线材的拉伸性能

导线尺寸/AWG	硬拉铜线材(ASTM B1)					硬拉铜合金线材的最小抗拉强度(ASTM B105)												ASTM B105最小伸长率(%)
	名义抗拉强度①		名义伸长率②(%)	名义断裂极限		C65100		C51000		C50700		C16500		C19600		C16200		
	MPa	ksi		牛顿	磅力	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
4/0	340	49.0	3.8	36220	8143	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3/0	350	51.0	3.3	29900	6720	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2/0	365	52.8	2.8	24550	5519	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1/0	375	54.5	2.4	20095	4518	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	385	56.1	2.2	17290	3888	672	97.5	707	102.5	510	74.0	524	76.0	510	74.0	496	72.0	2.2
2	395	57.6	2.0	13350	3002	716	103.8	750	108.8	552	80.0	536	77.8	520	75.5	507	73.5	2.0
3	405	59	1.8	10850	2439	741	107.5	776	112.5	586	85.0	547	79.3	534	77.5	517	75.0	1.8
4	415	60.1	1.7	8762	1970	760	110.2	794	115.2	614	89.0	558	80.9	545	79.0	527	76.4	1.6
5	420	61.2	1.6	7072	1590	774	112.2	808	117.2	638	92.5	568	82.4	552	80.0	534	77.5	1.5
6	430	62.1	1.4	5693	1280	786	114.0	820	119.0	654	94.8	579	84.0	558	81.0	542	78.6	1.4
7	435	63	1.3	4580	1030	795	115.3	829	120.3	665	96.5	590	85.5	568	82.4	550	79.8	1.3
8	440	63.7	1.3	3674	826.1	804	116.6	836	121.6	675	97.9	600	87.0	576	83.5	558	81.0	1.3
9	445	64.3	1.2	2940	660.9	812	117.8	847	122.8	683	99.0	610	88.5	583	84.6	567	82.2	1.2
10	445	64.9	1.2	2354	529.3	820	118.9	854	123.9	690	100.1	620	90.0	590	85.5	575	83.4	1.2
11	450	65.4	11	1880	423	826	119.8	860	124.8	698	101.2	630	91.3	597	86.6	583	84.6	1.2
12	455	65.7	1.1	1500	337	832	120.6	866	125.6	705	102.2	638	92.6	605	87.7	591	85.7	1.1
13	455	65.9	1.1	1190	268	836	121.2	870	126.2	710	103.0	647	93.8	612	88.8	598	86.8	1.1
14	455	66.2	1.0	952	214	839	121.7	874	126.7	715	103.7	655	95.0	619	89.8	605	87.8	1.1
15	460	66.4	1.0	756	170	843	122.2	877	127.2	720	104.4	662	96.0	625	90.6	612	88.7	1.0
16	460	66.6	1.0	600	135	845	122.5	879	127.5	725	105.2	669	97.0	634	92.0	617	89.5	1.0
17	460	66.8	1.0	480	108	847	122.8	881	127.8	730	105.9	676	98.0	640	92.8	623	90.3	1.0
18	460	67.0	1.0	380	85.5	848	123.0	883	128.0	735	106.6	680	98.6	645	93.5	627	91.0	0.9
19	463	67.2	—	302	68.0	849	123.2	884	128.2	740	107.3	683	99.0	648	94.0	632	91.6	0.9
20	465	67.4	—	241	54.2	852	123.5	886	128.5	745	108.0	686	99.5	652	94.5	636	92.2	0.9
21	467	67.7	—	192	43.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	468	67.9	—	152	34.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	470	68.1	—	121	27.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	471	68.3	—	96.5	21.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	473	68.6	—	77.0	17.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	474	68.8	—	60.9	13.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	476	69.0	—	48.5	10.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	478	69.3	—	38.4	8.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
29	479	69.4	—	31.0	6.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	481	69.7	—	24.3	5.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

导线尺寸/AWG	硬拉铜线材（ASTM B1）					硬拉铜合金线材的最小抗拉强度（ASTM B105）												ASTM B105最小伸长率（%）
	名义抗拉强度[1]		名义伸长率[2]（%）	名义断裂极限		C65100		C51000		C50700		C16500		C19600		C16200		
	MPa	ksi		牛顿	磅力	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
31	482	69.9	—	19.3	4.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	484	70.2	—	15.7	3.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
33	485	70.4	—	12.4	2.79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
34	487	70.6	—	9.79	2.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	489	70.9	—	7.78	1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	490	71.1	—	6.23	1.40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37	492	71.3	—	5.03	1.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	493	71.5	—	4.39	0.898	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
39	495	71.8	—	3.07	0.691	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40-44	496	72.0	—	2.42 ~ 1.00	0.543 ~ 0.226	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

①若线材拉入的绕盘小于480mm（19in），则抗拉强度不一定能满足。 ②延伸长度250mm（10in）。

方形和矩形线材。ASTM B48 规定了软（经退火的）方形和矩形线材。

绞合线材。它通常用于电工用途，无论在使用或铺设时都会有一定程度的绕曲。为了提高它的柔性，绞合线材通常有同轴捻、单捻、绳捻以及集束的绞合形式。

同轴捻的绞合电线和电缆是由一根中央心线外面围绕着一层或多层螺旋形的捻线构成，相邻的线层以相反的螺旋方向捻制，捻线的长度逐层增加。其最外层通常绞成左旋。

ASTM B8 为同轴捻绞合电线和电缆设立了从 AA（最粗）到 D（最细）的五个等级。表 3.2-14 列出了其详细的同轴捻合的结构。

表 3.2-14 ASTM B8 规定的同轴捻绞合铜导线的特征

导线尺寸/圆密耳[2]或AWG	名义重量/（lb/1000ft[1]）	名义电阻/（Ω/1000ft[1]）	等级 AA		等级 A		等级 B		等级 C		等级 D	
			线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]
5000000	15890	0.002178	—	—	169	172.0	217	151.8	271	135.8	271	135.8
4500000	14300	0.002420	—	—	169	163.2	217	144.0	271	128.9	271	128.9
4000000	12590	0.002696	—	—	169	153.8	217	135.8	271	121.5	271	121.5
3500000	11020	0.003082	—	—	127	166.0	169	143.9	217	127.0	271	113.6
3000000	9353	0.003561	—	—	127	153.7	169	133.2	217	117.6	271	105.2
2500000	7794	0.004278	—	—	91	165.7	127	140.3	169	121.6	217	107.3
2000000	6175	0.005289	—	—	91	148.2	127	125.5	169	108.8	217	96.0
1900000	5886	0.005568	—	—	91	144.5	127	122.3	169	106.0	217	93.6
1800000	5558	0.005877	—	—	91	140.6	127	119.1	169	103.2	217	91.1
1750000	6403	0.006223	—	—	91	138.7	127	117.4	169	101.8	217	89.8
1700000	5249	0.006045	—	—	91	136.7	127	115.7	169	100.3	217	88.5
1600000	4940	0.006612	—	—	91	132.6	127	112.2	169	97.3	217	85.9

(续)

导线尺寸/圆密耳[2]或AWG	名义重量/(lb/1000ft[1])	名义电阻/(Ω/1000ft[1])	等级 AA		等级 A		等级 B		等级 C		等级 D	
			线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]	线号	单根线直径/mil[1]
1500000	4631	0. 007052	—	—	61	156. 6	91	128. 4	127	108. 7	169	94. 2
1400000	4323	0. 007556	—	—	61	151. 5	91	124. 0	127	105. 0	169	91. 0
1300000	4014	0. 008137	—	—	61	146. 0	91	119. 5	127	101. 2	169	87. 7
1250000	3859	0. 008463	—	—	61	143. 1	91	117. 2	127	99. 2	169	86. 0
1200000	3705	0. 008815	—	—	61	140. 3	91	114. 8	127	97. 2	169	84. 3
1100000	3396	0. 009617	—	—	61	134. 3	91	109. 9	127	93. 1	169	80. 7
1000000	3088	0. 01088	37	164. 4	61	128. 0	61	128. 0	91	104. 8	127	88. 7
900000	2779	0. 01175	37	156. 0	61	121. 5	61	121. 5	91	99. 4	127	84. 2
800000	2470	0. 01322	37	147. 0	61	114. 5	61	114. 5	91	93. 8	127	79. 4
750000	2316	0. 01410	37	142. 4	61	110. 9	61	110. 9	91	90. 8	127	76. 8
700000	2161	0. 01511	37	137. 5	61	107. 1	61	107. 1	91	87. 7	127	74. 2
650000	2007	0. 01627	37	132. 5	61	103. 2	61	103. 2	91	84. 5	127	71. 5
600000	1853	0. 01763	37	127. 3	37	127. 3	61	99. 2	91	81. 2	127	68. 7
550000	1698	0. 01923	37	121. 9	37	121. 9	61	95. 0	91	77. 7	127	65. 8
500000	1544	0. 02116	19	162. 2	37	116. 2	37	116. 2	61	90. 5	91	74. 1
450000	1389	0. 02351	19	153. 9	37	110. 3	37	110. 3	61	85. 9	91	70. 3
400000	1235	0. 02645	19	145. 1	19	145. 1	37	104. 0	61	81. 0	91	66. 3
350000	1081	0. 03022	12	170. 8	19	135. 7	37	97. 3	61	75. 7	91	62. 0
300000	926. 3	0. 03526	12	158. 1	19	125. 7	37	90. 0	61	70. 1	91	57. 4
250000	771. 9	0. 04231	12	144. 3	19	114. 6	37	82. 2	61	64. 0	91	52. 4
4/0	655. 3	0. 04999	7	173. 9	7	173. 9	19	105. 5	37	75. 6	61	58. 9
3/0	518. 1	0. 06304	7	154. 8	7	154. 8	19	94. 0	37	67. 3	61	52. 4
2/0	410. 9	0. 07948	7	137. 9	7	137. 9	19	83. 7	37	60. 0	61	46. 7
1/0	326. 0	0. 1002	7	122. 8	7	122. 8	19	74. 5	37	53. 4	—	—
1	258. 4	0. 1264	3	167. 0	7	109. 3	19	66. 4	37	47. 6	—	—
2	204. 9	0. 1594	3	148. 7	7	97. 4	7	57. 4	19	59. 1	—	—
3	162. 5	0. 2010	3	132. 5	7	86. 7	7	86. 7	19	52. 6	—	—
4	128. 9	0. 2534	3	118. 0	7	77. 2	7	77. 2	19	48. 9	—	—
5	102. 2	0. 3197	—	—	—	—	7	68. 8	19	41. 7	—	—
6	81. 05	0. 4031	—	—	—	—	7	61. 2	19	37. 2	—	—
7	64. 28	0. 5081	—	—	—	—	7	54. 5	19	33. 1	—	—
8	50. 98	0. 6407	—	—	—	—	7	48. 6	19	29. 5	—	—
9	40. 42	0. 8081	—	—	—	—	7	43. 2	19	28. 2	—	—

注：名义电阻指未涂层电线。

①ASTM B8 技术指标使用的单位。 ②圆密耳，一种用于计量导线截面的面积单位，它等于直径 1mil，即 0. 001in 的圆的面积 =7. 854 × 10^{-7} in^2。——译者注。

单捻绞合电线是由多于一层的螺旋捻线绕在一根中央心线而成的，所有各层的捻线有同样的长度及螺旋方向，这种类型的电线有时也称之为“光滑绞合线”。各层通常均为左旋。

用一股(或多股)绞合线作为一根中央心线并围绕其外面螺旋形地捻合一层或多层的类似股线，绳捻绞合电线和电缆依此绞合而成。上述各绞合股线可以是同轴绞合或束绞的。ASTM B173和B172为绳捻绞合导线设立了五个等级：等级G和H为同轴绞合股线，等级I、K和M为集束股线。表3.2-15和表3.2-16列出了其详细的绞合结构。这种电缆通常用来制造大型、柔性的导电体并应用于便携式的用途，如矿用电缆或器具电缆。

表3.2-15 ASTM B173规定的由无涂层或镀锡的同轴绞合股线构成的绳捻绞合铜导线的特征

导线尺寸/圆密耳或AWG	等级G				等级H			
	单线直径①/mil	绳号	每股绳中的电线数	净重①(lb/1000ft)	单线直径①/mil	绳号	每股绳中的电线数	净重①(lb/1000ft)
5000000	65.7	61	19	16052	53.8	91	19	15057
4500000	62.3	61	19	14434	51.0	91	19	14429
4000000	58.7	61	19	12814	48.1	91	19	12835
3500000	55.0	61	19	11249	45.0	91	19	11234
3000000	50.9	61	19	9635	41.7	91	19	9647
2500000	59.6	37	19	8012	46.4	61	19	8006
2000000	53.3	37	19	6408	41.5	61	19	6405
1900000	52.0	37	19	6099	40.5	61	19	6100
1800000	50.6	37	19	5775	39.4	61	19	5773
1750000	49.9	37	19	5617	38.9	61	19	5627
1700000	49.2	37	19	5460	38.3	61	19	5455
1600000	47.7	37	19	5132	37.2	61	19	5146
1500000	59.3	61	7	4772	46.2	37	19	4815
1400000	57.3	61	7	4456	44.6	37	19	4487
1300000	55.2	61	7	4135	43.0	37	19	4171
1250000	54.1	61	7	3972	42.2	37	19	4017
1200000	53.0	61	7	3814	41.3	37	19	3847
1100000	50.8	61	7	3502	39.6	37	19	3537
1000000	48.4	61	7	3179	37.7	37	19	3206
900000	45.9	61	7	2859	35.8	37	19	2891
800000	43.3	61	7	2544	33.7	37	19	2562
750000	41.9	61	7	2383	32.7	37	19	2412
700000	40.5	61	7	2226	31.6	37	19	2252
650000	39.0	61	7	2046	30.4	37	19	2085
600000	37.5	61	7	1908	29.2	37	19	1923
550000	35.9	61	7	1749	28.0	37	19	1768
500000	43.9	37	7	1579	34.2	61	7	1587
450000	41.7	37	7	1425	32.5	61	7	1433
400000	39.3	37	7	1265	30.6	61	7	1271

（续）

导线尺寸/圆密耳或 AWG	等 级 G				等 级 H			
	单线直径①/mil	绳号	每股绳中的电线数	净重①(lb/1000ft)	单线直径①/mil	绳号	每股绳中的电线数	净重①(lb/1000ft)
350000	36.8	37	7	1109	28.6	61	7	1110
300000	34.0	37	7	947.1	26.5	61	7	953.0
250000	31.1	37	7	792.4	24.2	61	7	794.8
4/0	39.9	19	7	666.6	28.6	37	7	670.1
3/0	35.5	19	7	527.7	25.5	37	7	532.7
2/0	31.6	19	7	418.1	22.7	37	7	422.3
1/0	28.2	19	7	333.0	20.7	37	7	334.3
1	25.1	19	7	263.8	18.0	37	7	265.4
2	36.8	7	7	206.9	22.3	19	7	208.2
3	37.8	7	7	164.4	19.9	19	7	165.8
4	29.2	7	7	130.3	17.7	19	7	131.2
5	26.0	7	7	103.3	15.8	19	7	104.5
6	23.1	7	7	81.52	14.0	19	7	82.06
7	20.6	7	7	64.83	12.5	19	7	65.42
8	18.4	7	7	51.72	11.1	19	7	51.59
9	15.3	7	7	40.59	9.9	19	7	41.04
10	14.6	7	7	32.57	—	—	—	—
12	11.5	7	7	20.20	—	—	—	—
14	9.2	7	7	12.93	—	—	—	—

①使用 ASTM B173 的单位。

表 3.2-16 ASTM B172 规定的无涂层或镀锡集束股线的绳捻绞合铜导线的特征

导线尺寸/圆密耳或 AWG	绞合等级	结构和导线尺寸/AWG	总导线数量	近似直径/in	净重/(lb/1000ft)
1000000	I	19×7×19/24	2527	1.290	3306
	K	37×7×39/30	10101	1.329	3272
	M	61×7×59/34	25193	1.353	3239
900000	I	19×7×17/24	2261	1.217	2959
	K	37×7×35/30	9065	1.255	2936
	M	61×7×53/34	22631	1.279	2909
800000	I	19×7×15/24	1995	1.140	2611
	K	19×7×60/30	7980	1.174	2585
	M	61×7×47/34	20069	1.200	2580
750000	I	19×7×14/24	1862	1.099	2437
	K	19×7×57/30	7581	1.143	2455
	M	61×7×44/34	18788	1.160	2415

（续）

导线尺寸/圆密耳或AWG	绞合等级	结构和导线尺寸/AWG	总导线数量	近似直径/in	净重/(lb/1000ft)
700000	I	19×7×13/24	1729	1.057	2262
	K	19×7×52/30	6916	1.089	2240
	M	61×7×41/34	17507	1.117	2251
650000	I	19×7×12/24	1596	1.014	2088
	K	19×7×49/30	6517	1.056	2111
	M	61×7×38/34	16226	1.074	2086
600000	I	7×7×30/24	1470	0.971	1906
	K	19×7×45/30	5985	1.010	1938
	M	61×7×35/34	14945	1.028	1921
550000	I	7×7×28/24	1372	0.936	1779
	K	19×7×41/30	5453	0.961	1766
	M	61×7×32/34	13664	0.981	1757
500000	I	7×7×25/24	1225	0.882	1588
	K	19×7×38/30	5054	0.924	1637
	M	37×7×49/34	12691	0.900	1631
450000	I	7×7×23/24	1127	0.845	1461
	K	19×7×34/30	4522	0.871	1465
	M	37×7×44/34	11396	0.892	1465
400000	I	7×7×20/24	980	0.785	1270
	K	1×7×30/30	3990	0.816	1292
	M	37×7×39/34	10101	0.837	1298
350000	I	7×7×18/24	882	0.743	1143
	K	19×7×26/30	3458	0.757	1120
	M	37×7×34/34	8806	0.779	1132
300000	I	7×7×15/24	735	0.675	953
	K	7×7×61/30	2989	0.701	959
	M	19×7×57/34	7581	0.720	975
250000	I	7×7×13/24	637	0.626	826
	K	7×7×61/30	2499	0.638	802
	M	19×7×48/34	6384	0.658	821
4/0	I	19×28/24	532	0.569	683
	K	7×7×43/30	2107	0.584	676
	M	19×7×40/34	5320	0.598	684
3/0	I	19×22/24	418	0.502	537
	K	7×7×34/30	1666	0.516	535
	M	19×7×32/34	4256	0.532	547

（续）

导线尺寸/圆密耳或AWG	绞合等级	结构和导线尺寸/AWG	总导线数量	近似直径/in	净重/(lb/1000ft)
2/0	I	19×18/24	342	0.452	439
	K	7×7×27/30	1323	0.457	424
	M	19×7×25/34	3325	0.467	427
1/0	I	19×14/24	266	0.396	342
	K	19×56/30	1064	0.408	338
	M	7×7×54/34	2646	0.414	337
1	I	7×30/24	210	0.350	267
	K	19×44/30	836	0.359	266
	M	7×7×43/34	2107	0.368	268
2	I	7×23/24	161	0.304	205
	K	19×35/30	665	0.319	211
	M	7×7×34/34	1666	0.325	212
3	I	7×19/24	133	0.275	169
	K	19×28/30	532	0.283	169
	M	7×7×27/34	1323	0.288	168
4	I	7×15/24	105	0.243	134
	K	7×60/30	420	0.250	132
	M	19×56/34	1064	0.257	134
5	I	7×12/24	84	0.216	107
	K	7×48/30	336	0.223	106
	M	19×44/34	836	0.226	105
6	I	7×9/24	63	0.186	80
	K	7×38/30	266	0.197	84
	M	19×35/34	665	0.201	84
7	K	7×30/30	210	0.174	66
	M	19×28/34	532	0.178	67
8	K	7×/30	168	0.155	53
	M	7×60/34	420	0.158	53
9	K	7×19/30	133	0.137	42
	M	7×48/34	336	0.140	42
10	M	7×37/34	259	0.122	33
12	M	7×24/34	168	0.097	21

束绞电线由任何数量的导线以同样的方向扭捻在一起，而与其单股绞合的几何布列无关。ASTM B174规定了五个等级（I、J、K、L和M），这些导线通常用于柔性缆线、架空线和专用柔性焊接导线。表3.2-17列出其典型的详细结构。

镀锡电线。实心和绞合线都适合镀锡。它们

都是按照ASTM标准制造的：最新版的B33适用软或退火的镀锡铜线，B246适用硬拉或中硬拉的镀锡铜线。表3.2-18列出镀锡、圆和实心线的特征。

表3.2-17 ASTM B174规定的无涂层或镀锡股线的束绞铜导线的特征

导线尺寸/AWG	绞合等级	导线的数量和尺寸/AWG	近似直径/in	近似重量/(lb/1000ft)	导线尺寸/AWG	绞合等级	导线的数量和尺寸/AWG	近似直径/in	近似重量/(lb/1000ft)
7	I	52/24	0.168	64.9	16	J	16/28	0.057	7.84
8	I	41/24	0.148	51.1		K	26/30	0.058	8.03
9	I	33/24	0.132	41.2		L	41/32	0.059	8.10
10	I	26/24	0.117	32.4		M	65/34	0.059	7.97
	J	65/28	0.118	31.9	18	J	10/28	0.044	4.90
	K	104/30	0.120	32.1		K	16/30	0.045	4.94
12	J	41/28	0.093	20.1		L	26/32	0.046	5.14
	K	65/30	0.094	20.1		M	41/34	0.046	5.02
	L	104/32	0.096	20.6	20	J	7/28	0.038	3.43
14	J	26/28	0.073	12.7		K	10/30	0.035	3.09
	K	41/30	0.074	12.7		L	16/32	0.036	3.16
	L	65/32	0.075	12.8		M	26/34	0.037	3.19
	M	104/34	0.076	12.7					

表3.2-18 ASTM B33、B246、B258规定的镀锡、实心圆导线的特征

导线尺寸/AWG	净重/(lb/1000ft)	软(退火)导线		硬拉导线	
		名义电阻/(Ω/1000ft)	最小伸长率[①](%)	名义电阻/(Ω/1000ft)	最小断裂强度/lbf
2	200.9	0.1609	25	—	—
3	159.3	0.2028	25	—	—
4	126.3	0.2557	25	0.2680	1773
5	100.2	0.3226	25	0.3380	1432
6	79.44	0.4067	25	0.4263	1152
7	63.03	0.5127	25	0.5372	927.3
8	49.98	0.6465	25	0.6776	743.1
9	39.62	0.8154	25	0.8545	595.1
10	31.43	1.039	20	1.087	476.1
11	24.9	1.31	20	1.37	381.0
12	19.8	1.65	20	1.73	303.0
13	15.7	2.08	20	2.18	241.0
14	12.4	2.62	20	2.74	192.0
15	9.87	3.31	20	3.46	153.0
16	7.81	4.18	20	4.37	121.0

（续）

导线尺寸/AWG	净重/(lb/1000ft)	软(退火)导线		硬拉导线	
		名义电阻/(Ω/1000ft)	最小伸长率[①](%)	名义电阻/(Ω/1000ft)	最小断裂强度/lbf
17	6.21	5.26	20	—	—
18	4.92	6.66	20	—	—
19	3.90	8.36	20	—	—
20	3.10	10.6	20	—	—
21	2.46	13.3	20	—	—
22	1.94	16.9	20	—	—
23	1.55	21.1	20	—	—
24	1.22	26.7	15	—	—
25	0.970	34.4	15	—	—
26	0.765	43.5	15	—	—
27	0.610	54.5	15	—	—
28	0.481	69.3	15	—	—
29	0.387	86.1	15	—	—
30	0.303	110.0	10	—	—
31	0.204	141.0	10	—	—
32	0.194	174.0	10	—	—
33	0.153	221.0	10	—	—
34	0.120	281.0	10	—	—

①按250mm(10in)。

盘条的制造

盘条是制造线材的半成品。盘条是在美国对该半成品的称呼，而在国际标准和海关文件里，都称之为拉制坯料。

轧制。将粗铜变为盘条的传统工艺就是铸造线坯的热轧。几乎所有的拉制坯料都要轧制到直径8mm(0.32in)。特殊订货可以达到22mm(0.87in)或更大的直径尺寸。

一些特殊的无氧铜线坯采用垂直浇铸法进行生产，但是大部分的线坯还是使用韧铜在敞开的铸型里通过水平浇铸而得到的。氧含量控制在0.03%~0.06%，并通过浇铸获得一个水平表面。铸造线坯的每根重量为接近110~135kg(250~300lb)。其端部呈锥形，以便于进入热轧机的第一道通道。

在进入轧制之前，铸锭要在中性气氛中加热到近925℃(1700℉)，然后在一连轧机上经过一系列的压制成为直径近6~22mm(1/4~7/8in)的圆棒。热轧铜圆棒被卷成盘条以供水淬，然后经酸洗，去除在热轧过程中产生的黑色氧化铜。这种方法生产盘条的速度可达到7.5kg/s(30t/h)。

这种工艺的缺点是：

- 必须有高投资成本，才能取得低的运行成本；
- 卷料较小，故必须进行焊接才能维持有效生产，而在连续拉丝工序里焊接接头将作为潜在的弱点而存在；
- 对于某些特殊的线材用途，不适合使用铸造线锭的轧制圆棒。

连铸。由于利用传统铸造线锭生产轧制圆棒所存在的固有缺点，故开发出将液态金属直接、连续地浇铸成盘条的工艺，这样就可以避免线锭的中途间断。连铸盘条已经成为铜盘条市场的主导，现已占据盘条总产量的50%以上。

连铸和轧制的优点是：

- 大吨位的卷料，达10Mg(11t)；
- 便于废料的回炉处理，大大降低成本；

- 提高圆棒的质量及其表面质量；
- 有均匀的金相状态并利于实行严格的工艺控制；
- 对于中等生产率可采用低投资成本和低运行成本。

线材的拉制及其绞合

圆棒的制备。为了获得好的表面质量，必须要有光滑、无氧化物的干净盘条。传统的热轧圆棒必须以分隔作业进行清洁，由于连铸能提供较好的表面质量，所以不再要求分隔作业的清洁工序，从轧机出来的圆棒只需经过一清洁工位。

清洁铜盘条的标准方法是先用热的20%硫酸进行酸洗再用清水冲淋。当生产细线材时，必须使圆棒得到更好的表面质量。这可以通过几种方法来实现。其中一种方法就是冷拉圆棒的敞开式火焰退火——即在氧化气氛中加热到700℃（1300 ℉），用于消除浅显的缺陷。更加普遍的方法是模具剃修，尤其适用于细磁性导线。其方法是将圆棒通过一个用钢或碳化物制造的圆形切削模孔进行拉制，以此能在全部的圆棒表面刮去大约0.13mm（0.005in）的厚度。对于用传统铸造线锭制成的圆棒要采用进一步的修整方法，即先刮去铸造线锭最外面的表层，之后再对热轧坯进行拉模精整。

拉丝。单模机也称拉丝机，用于拉制特别粗的截面，如架空滑接线。拉制的速度范围约为1～2.5m/s（200～500ft/min）。一般将牛脂作为润滑剂使用，并且通过以淬火钢或碳化钨制成的拉模进行拉制。在某些情况下，使用串式的多级压缩的拉丝机（以3或5轧次为一组），以此替代单级拉丝机器。

每台机器有10～12个拉模的串式拉丝机组，用于热轧或连铸铜圆棒的粗拉轧制。圆棒以25m/s（5000ft/min）的速度被拉制通过拉模，其直径从8.3mm（0.325in）压缩到接近2mm（0.08in）。拉丝机连续运行，仅有的作业是将一卷的末端与下一卷的起始端焊接在一起。

中等和细的线材用较小的机器进行拉制，它们每台有12～20个或更多的拉模。线径的截面积逐级缩小20%～25%。中等机器能生产小到0.5mm（0.020in）的直径，而小的拉丝机能生产从0.5mm（0.020in）到0.25mm（0.010in）的直径。拉制的速度一般为25～30m/s（5000～6000ft/min），甚至更高。

所有拉制过程中，都要大量使用润滑剂来冷却线材，并防止拉模的快速磨损。传统的润滑剂为肥皂和脂肪乳液，它们从中心储罐送至所有的机器上。圆棒的粗拉通常要求近7%的润滑剂浓度，拉制中等和细线材要求的浓度则为2%～3%。如今越来越广泛地采用合成润滑剂。

根据下一工序的需要拉制而成的线材，被绕储在卷轴或轴杆部件上。细线材被绕到最小能承受4.5kgf（10lbf）的卷轴上，在轴杆部件上最大能承受450kgf（1000lbf）载荷。为了保证连续运行，许多拉丝机都配备双重装载系统。当一个卷轴绕满时，机器就会自动将线材改换到邻近的空卷轴上去，同时将其切断。于是操作工就可以把满载的卷轴卸下，代之以空卷轴，而不需使拉丝工序停顿。

扁形或矩形线材的生产。根据尺寸和质量的要求，扁形或矩形线材可以在拉丝机或互成直角的四辊轮拉丝机（Turk's head machine），或者在带有水平和垂直辊轮的串式轧机上轧制。较大批量的在轧机上生产，而较小量的则用拉丝方法生产。

退火。就像任何一种冷变形加工工艺一样，拉丝可以提高铜的抗拉强度和降低其塑性。虽然通过冷变形加工铜的最大面积压缩量可达到99%，但是通常铜的线材在达到90%的压缩量后要进行退火。

在一些工厂里，当铜线材从拉丝机里出来时就用电阻加热法进行完全退火。从拉丝工序出来的线材经过一段与托轮相接触的适当距离，此时托轮所载有的电流必须在不到1s的时间内将线材加热到高于其再结晶温度。

在实行批量退火的工厂里，拉制成的线材在一个连续通道炉进行处理，这时线材卷料在行进中在中性或弱还原气氛的过程中进行退火；或者在分批生产的钟罩炉里的与上相似的保护气氛中进行处理。退火的温度范围为400～600℃（750～1100℉），主要取决于线材的直径及其卷料的重量。

线材的镀层。作为电工应用铜导线主要采用四种镀层：

- 铅或铅合金（80Pb-20Sn），ASTM B189；
- 镍，ASTM B355；
- 银，ASTM B298；
- 锡，ASTM B33。

镀层适用于：

- 在布线应用里，保持其可锡焊性；
- 涂层在铜与其绝缘材料如橡胶之间成为一种阻隔，以此防止它们发生反应并形成粘着（由于这种粘着会使绝缘层不易从导体表面剥离，从而影响导体与导体之间的电连接）；
- 防止铜在高温用途期间发生氧化。

锡-铅合金镀层和纯锡镀层都是最普通的，镍和银则用于特种和高温的用途里。

铜线材可以借助于在熔化金属槽里热浸渍、电镀或包覆的方法进行镀层。电镀由于具有连续处理的优点，故成为一种主要的工艺方法，特别因为它能在拉丝工序之后“在线”地进行。

绞合线材。其生产过程就是将若干根导线搓拧或编织在一起成为一种有柔性的缆线。在保证一定的电流通过能力的情况下，可以通过改变作为单根线的数量、尺寸和布列方式而实现不同的柔性程度。实心线、同轴绞合、绳捻绞合和束绞的柔性程度依次增加，在最后三种绞合线中，大量较细的导线能产生更大的柔性。

绞合铜线和铜缆是在称为搓捻机或绞合机的机器上制造的。传统的搓捻机用于绞合小直径的线材(34AWG(圆密耳)～10AWG)。各条导线从排列在绞合设备一侧的卷轴上放线并接入绕着接收卷轴旋转的飞臂，拧成导线。飞臂相对于接受卷轴的旋转速度控制着集束搓捻的长度。对于小型、便于携带的柔性电缆，单根的铜丝通常为30AWG～34AWG，每一电缆含有多达150根的这样的铜丝。

一台筒形搓捻机，在其机内可以安装有多达18个放线卷轴。铜丝从各个卷轴上放线且保持在一个水平面上沿着一筒管穿行，借助筒管的旋转铜丝相互拧在一起。在其接入端，绞合线通过一个闭合模来形成最终集束的形状。成品绞合线也绕在位于机器内部的一个卷轴上。

传统用于大直径铜线的绞合机里的供线卷轴均固定在设备中的一个旋转框架上，并围绕着成品导线的轴线作旋转。有两种基本类型的机器：一种即所谓的刚性框架绞合机，按其各个供线卷轴的安置使得每一条铜线相对于绞合机的每一周旋转都能得到一次完整的搓拧；另一种就是所谓的行星绞合机，当框架旋转时，铜线并没有发生搓拧。

这种绞合机是由多个机架间隔构成，第一个间隔里有六个卷轴，继之，间隔的卷轴数以六的倍数递增。处于绞合线缆中央的心线在外放线。它通过机器的中心，而其他单股线则缠绕其上。多达127股线的绞合线就是以这种方式，按其对单股线的绞合能力一次或两次穿过机器而生产的。

正常情况下，硬拉铜是在行星绞合机上绞合的，因此绞合线将不会弹松，而将保持集束即使是截断也不会发生弹开。最后的产品绕在一个有动力驱动的外部卷轴上，它能使绞合线保持预定量的张力。

导线的绝缘和涂装

在三类常见的绝缘材料——聚合物、瓷漆以及纸和油——中，聚合物绝缘应用得最为广泛。

聚合物绝缘。最普通的聚合物就是聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯、二元乙丙橡胶(EPR)、硅橡胶、聚四氟乙烯(PTFE)以及氟化乙丙烯(FEP)。聚酰亚胺涂层用于耐火的至关重要的场合，如为载人宇宙飞船布设的线束。直到几年前，天然橡胶还在被使用，但是现在已经为合成的如异丁烯橡胶和EPR所替代。合成橡胶适用于任何必须保持良好柔性的用途，如焊接或采矿用的电缆。

现已能制造出许多不同种类的PVC，包括多种阻燃型的。PVC有良好的绝缘强度和柔性，并且是最廉价的传统绝缘和涂装材料之一。它主要应用于通信电线、低压的动力电缆。PVC绝缘一般被选用于要求温度在75℃(165℉)以下连续运行的用途。

聚乙烯由于其低且稳定的介电常数而被规定应用于要求较好电工性能的时候。它能耐磨损和溶剂。它主要用于高架线、通信线以及高压电缆。交联聚乙烯(XLPE)是在聚乙烯中添加有机过氧化物再对其混合物进行硫化而制成的，并形成较好的耐热性、力学性能、时效特征，并且能免除环境应力开裂。专用配方可以为交联聚乙烯提供阻燃性。一般的用途包括建筑用电线、控制电缆和动力电缆。最高能承受的工作温度通常为90℃(200℉)。

聚四氟乙烯和氟化乙丙烯用于喷气式飞机、电子设备和专用控制电缆用电线的绝缘，此时耐热性、耐溶剂性和高可靠性都是很重要的。这些电缆的工作温度能高达250℃(480℉)。

一切聚合化合物都是通过热挤用于铜导线上的。挤压机是一种能将热塑聚合物的颗粒材料或粉末转变成为连续的涂覆层的机器。将绝缘化合物放进一个料斗里，经由它送入长形的加热室里。一个连续旋转的螺旋推进器将颗粒材料送进热区，聚合物在那里软化并变成流体。在加热室的末端，熔化的化合物被压出，经过一个小孔模并覆于也经过孔模开口并移动着的导线上。当经绝缘的导线离开挤压机后，即进入水里冷却随后就绕在卷轴上。用EPR和XLPE涂装的电缆，在冷却之前还要通过一个硫化物室，至此交联工艺得以完成。

瓷漆膜绝缘。涂膜导线通常为细磁线，即一种用薄、柔性的漆膜涂覆的金属导线。这种绝缘导线用于电气装置里的电磁线圈，并必须能承受很高的击穿电压。额定温度范围为105～220℃(220～425℉)，具体取决于瓷漆的成分。最常用的瓷漆是以聚乙烯醇缩乙醛、聚酯和环氧树脂为基料的。

用于导线瓷漆涂覆的设备常是为客户专门制造的，但也有标准生产线。基本上所设计的系统都是用于同时绝缘大量的导线。导线被引导通过一台瓷漆涂覆机，将瓷漆液体以可控的厚度涂覆在导线的表面。然后导线再经过一系列的烤箱来处理涂层，成品导线卷在线轴上。为了得到厚层的瓷漆涂层，有必要让导线多次通过处理系统。近年来，一些制造商在试着用粉末涂层的方法，这可以避免溶剂被释放出来，其特点就是通过这种对传统瓷漆的治理，使制造商更符合“职业安全和健康管理局和环境保护署”标准的要求。静电喷涂和流化床及其他试验装置都可用于涂层。

纸-油绝缘。纸浆是电气绝缘最古老的方法之一，至今仍用于某些用途。用经油浸渍的纤维纸绝缘高压电缆，这些电缆被应用于关键的电力分配用途。这种带形的纸借助专用机器螺旋形地缠绕在导线上，在这种机器上有6～12个安置在一个绕着电缆旋转的笼盒里的纸卷。纸带一层层、方向交替反向地进行缠绕，而且不得有扭曲。然后将经纸缠绕的电缆浸没在油箱里，使油液充满纸中的所有空隙，以此保证所有的空气都从被缠绕的电缆周围排出。

纸绝缘的其他主要用途是扁磁导线。在这种用途里，电磁线带(其宽厚比大于50:1)是用纸带螺旋形地重叠缠绕一层或多层而成的。这些纸层借用粘结剂或清漆粘结在导线上。这种绝缘在过载电流的条件下能提供高度可靠的机械隔离功效。

第4节　铜合金铸件

铜合金铸件应用于要求具有超耐腐蚀性、高热或电的传导性、良好的轴承表面质量以及其他特殊性能的用途。作为铸件，有可能使其零件做成用成形或切削的方法所无法容易得到的形状，而且用铸造方法制作零件常比用其他方法制造更加经济。

铜合金的种类

因为纯铜极其难以铸造，而且易于产生表面裂纹、疏松和形成内部缩孔，少量的合金元素(如铍、硅、镍、锡、锌和铬)就能用于改善铜的铸造特性。而加入较大量的合金元素则用于提高性能。

就像在本章第1节中所述，铜基铸件按照统一编号系统(UNS)用范围从C80000～C99999的编码命名。铸造铜合金有时也用凝固范围(即在液相线和固相线之间的温度范围)进行分类。本节中的“凝固的控制”部分，还将讨论各种铜合金的凝固范围。

成分。由于各种原因，铸造铜合金与其相应的锻压合金在成分上有所不同。一般而言，铸造在合金元素的使用上有较大的选择余地，因为成分对热或冷变形加工性质的影响并不重要。然而，在某些元素之间的不平衡性和在一些合金中的某些微量杂质将会削弱其铸造性，并造成铸件的质量问题。

许多铸造合金含有5%的铅或更多。含有如此高百分比铅含量的合金是不适宜进行热变形加工的，但是对于低速到中速的轴承来说是很理想的，因为铅能防止在边界润滑条件下发生的拉伤和过度磨损。

铸件的杂质允许含量一般大于相应的锻件——这还是由于某些杂质对于热或冷变形加工可加工性的负面影响。另一方面，一些影响热处理效果的杂质，则无论对于铸件还是锻压制品都必须避免。对于任何铸件的合金选择取决于五大因素：金属的成本、铸造性、切削性、性能以及最终成本。

铸造性

铸造性应该不要与流动性相混淆，后者只是对于金属在固化前能流过距离的一种度量。因而流动性仅是能决定熔化合金能否完全充满型腔的所有空间的各种因素中的一个。另一方面，铸造性也是与生产中再现表面细小结构的能力有关的一般性用词。通俗地说，良好的铸造性就是指采用普通的铸造工艺便可达到合金铸造的效果，无需在浇口、冒口、熔化、型砂状况或其他方面采取任何特殊工艺技术便可以制得良好的铸件。高流动性常能保证良好的铸造性，但就铸造合金的质量而言仅此是不够的。

铸造合金一般分为高收缩合金和低收缩合金。前一类包括锰青铜、铝青铜、硅青铜及一些锌白铜。其流动性比低收缩的红铜好，更易于浇铸，并且能在砂型、金属型、石膏型、压力浇铸和离心浇铸的工艺里得到高等级的铸件。使用高收缩合金时，有必要通过精心设计促使其形成方向性凝固，避免横截面发生突变，防止出现凹槽(采用大圆角)，还要合理配置浇冒口；所有这些设计上的注意点都有助于避免产生内部收缩和裂纹。还要防止进行紊流浇铸，以免使熔渣卷入铸件。充分应用冒口和发热化合物，能保证合适的熔化金属充满铸件的所有截面。表3.2-19所列是所选标准合金的铸造特点，包括砂型铸件的流动性和整体铸造性的比较排序；数字1表示排序中的最佳铸造性或流动性。

表 3.2-19 用于砂型铸件的主要铜合金的铸造性能

UNS编号	常用名称	收缩允许量(%)	近似液态温度		铸造性评估①	流动性评估①
			℃	℉		
C83600	铅红铜	5.7	1010	1850	2	6
C84400	铅浅红铜	2.0	980	1795	2	6
C84800	铅浅红铜	1.4	955	1750	2	6
C85400	铅黄铜	1.5~1.8	940	1725	4	3
C85800	黄铜	2.0	925	1700	4	3
C86300	锰青铜	2.3	920	1690	5	2
C86500	锰青铜	1.9	880	1615	4	2
C87200	硅青铜	1.8~2.0	—	—	5	3
C87500	硅青铜	1.9	915	1680	4	1
C90300	锡青铜	1.5~1.8	980	1795	3	6
C92200	铅锡青铜	1.5	990	1810	3	6
C93700	高铅锡青铜	2.0	930	1705	2	6
C94300	高铅锡青铜	1.5	925	1700	6	7
C95300	铝青铜	1.6	1045	1910	8	3
C95800	铝青铜	1.6	1060	1940	8	3
C97600	锌白铜	2.0	1145	2090	8	7
C97800	锌白铜	1.6	1180	2160	8	7

①砂型铸件的相对评估。对于铸造型和流动性，整个范围里的排序是1~8，1为最高或最好可能的评估。

所有的铜合金都能成功地用砂型进行铸造。砂型铸件在其尺寸和形状方面有最大的选择性，而且若铸件为数不多的话，它也是最为经济的铸造方法(压铸要超过近50000件才比较经济)。金属型最适合锡、硅、铝及锰的青铜和黄铜。压力铸造能很好地适用于黄铜，但是越来越多的金属模合金也适用压力铸造。两种方法的应用确实都受铸件尺寸的限制，尽管重量达到4500kg(10000lb)的扁锭也有用金属模铸造的。一般黄铜的压力铸造的重量小于0.2kg(0.5lb)，而且很少有大于0.9kg(2lb)。尺寸的限制是由于较大的铸件会导致模具寿命的缩短。

事实上，所有的铜合金都能很好地用离心铸工艺进行铸造。用于铸造的铸件几乎覆盖了从小于100g到超过22000kg(<0.25至>50000lb)的全部尺寸。

铝青铜、黄铜、锰青铜、低镍青铜以及硅黄铜和青铜，由于它们的低铅含量都最好采用石膏模铸造。在大部分的这些合金里，铅含量应该控制到最小，因为它会与石膏里的硫酸钙发生反应，造成铸件表面的颜色失真，并增加清理和切削加工的成本。尺寸也是石膏模铸造的一个限制，虽然重量小至100g(0.25lb)的铝青铜铸件可以用熔模(失蜡)铸造工艺，但大于150g(330lb)的还要用传统的石膏模制造。

凝固的控制。要始终保持完好的铸件生产，就需要知晓合金的凝固特征以及了解其收缩的相对量。一种合金与一种合金在凝固过程中的实际收缩量并没有大的差别。然而收缩的分布取决于凝固的温度范围和关键截面上的温度梯度。锰青铜和铝青铜与钢相似，它们的凝固范围十分窄小——大约分别为40℃和14℃(70℉和25℉)。大型铸件可以用与钢相同的传统方法进行制造，只要适当重视浇、冒口的安置——两者都用于控制其方向性凝固和对铸件主要中心空穴度的补缩。

青铜有较宽的凝固范围(如C83600为~165℃或300℉)。具有如此宽凝固范围的合金会在其凝固过程中形成一个粘糊区，从而造成枝晶间的收缩或显微收缩。因为在这种状况下无法进行很好的补缩，所以会在有影响的截面上造成疏松。为了克服这种负面影响，铸件的设计、冒口的设置和冷铁的运用都是很重要的。克服枝晶间收缩的另一种方法就是在浇铸的时候要保持对金属温度的严密控制，并确保快速冷却。这些要求限制了截面的厚度和浇铸的温度，而且这种方法必须保证具有良好方向性凝固的浇注系统。进行常规铸造的截面厚度小于25mm(1in)。截面厚度达到50mm(2in)可以铸造但是很困难，必须在严格控制的条件下进行。因此对于截面厚度大于25mm的铸件，建议使用凝固(冻结)的温度范围窄并具有良好方向性凝固特征的青铜。

在复杂铸件中，获得方向性凝固是很困难的。最为有效和最为简便的方法是使用冷铁。对于不规则的截面，冷铁的形状必须与它们所放置的铸型截面的轮廓相吻合。有时为了保持方向性凝固而使用保温垫和冒口套来降低某些区域的凝固速度，也是有效的。

力学性能

大部分含锡、铅或锌的铜基铸造合金仅有中等抗拉强度和屈服强度、低至中等的硬度以及高伸长率。当要求较高的抗拉强度和屈服强度时，就得代之以使用铝青铜、锰青铜、硅黄铜、硅青铜、铍铜以及一些锌白铜。大多数较高强度的合金都具有超过平均水平的耐腐蚀性和耐磨性。表3.2-20所列的是铜基铸造合金的力学性能和物理性质(所有这里讨论的以及表3.2-20所列的有关力学性能都是针对砂型铸造试棒，

作为铸件本身的性能还要更低一些,它取决于截面的 大小和工艺设计参数)。

表3.2-20 铸造铜合金的典型性能

UNS编号	抗拉强度		屈服强度①		压缩屈服强度②		伸长率(%)	硬度③HB	电导率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi			
ASTM B22									
C86300	820	119	468	68	490	71	18	225④	8.0
C90500	317	46	152	22	—	—	30	75	10.9
C91100	241	35	172	25	125 最小	18 最小	2	135④	8.5
C91300	241	35	207	30	165 最小	24 最小	0.5	170④	7.0
ASTM B61									
C92200	280	41	110	16	105	15	45	64	14.3
ASTM B62									
C83600	240	35	105	15	100	14	32	62	15.0
ASTMB66									
C93800	221	32	110	16	83	12	20	58	11.6
C94300	186	27	90	13	76	11	15	48	9.0
C94400	221	32	110	16	—	—	18	55	10.0
C94500	172	25	83	12	—	—	12	50	10.0
ASTM B67									
C94100	138	20	97	14	—	—	15	44	—
ASTM B148									
C95200	552	80	200	29	207	30	38	120④	12.2
C95300	517	75	186	27	138	20	25	140④	15.3
C95400	620	90	255	37	—	—	17	170④	13.0
C95400(HT)⑤	758	110	317	46	—	—	15	195④	12.4
C95410	620	90	255	37	—	—	17	170④	13.0
C95410(HT)⑤	793	116	400	58	—	—	12	225④	10.2
C95500	703	102	303	44	—	—	12	200④	8.8
C95500(HT)⑤	848	123	545	79	—	—	5	248④	8.4
C95600	517	75	234	34	—	—	18	140④	8.5
C95700	655	95	310	45	—	—	26	180④	3.1
C95800	662	96	255	37	241	35	25	160④	7.0
ASTM B176									
C85700	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C85800	380	55	205⑥	30⑥	—	—	15	—	22.0
C86500	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C87800	620	90	205⑥	30⑥	—	—	25	—	6.5
C87900	400	58	205⑥	30⑥	—	—	15	—	—
C99700	415	60	180	26	—	—	15	120④	3.0
C99750	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

UNS 编号	抗拉强度		屈服强度①		压缩屈服强度②		伸长率(%)	硬度③HB	电导率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi			
ASTM B584									
C83450	255	37	103	15	69	10	34	62	20.0
C83600	241	35	103	15	97	14	32	62	15.1
C83800	241	35	110	16	83	12	28	60	15.3
C84400	234	34	97	14	—	—	28	55	16.8
C84800	262	38	103	15	90	13	37	59	16.4
C85200	262	38	90	13	62	9	40	46	18.6
C85400	234	34	83	12	62	9	37	53	19.6
C85700	352	51	124	18	—	—	43	76	21.8
C86200	662	96	331	48	352	51	20	180④	7.4
C86300	820	119	469	68	489	71	18	225④	8.0
C86400	448	65	166	24	159	23	20	108④	19.3
C86500	489	71	179	26	166	24	40	130④	20.5
C86700	586	85	290	42	—	—	20	155④	16.7
C87300	400	58	172	25	131	19	35	85	6.1
C87400	379	55	165	24	—	—	30	70	6.7
C87500	469	68	207	30	179	26	17	115	6.1
C87600	456	66	221	32	—	—	20	135④	8.0
C87610	400	58	172	25	131	19	35	85	6.1
C90300	310	45	138	20	90	13	30	70	12.4
C90500	317	46	152	22	103	15	30	75	10.9
C92200	283	41	110	16	103	15	45	64	14.3
C92300	290	42	138	20	69	10	32	70	12.3
C92600	303	44	138	20	83	12	30	72	10.0
C93200	262	38	117	17	—	—	30	67	12.4
C93500	221	32	110	16	—	—	20	60	15.0
C93700	269	39	124	18	124	18	30	67	10.1
C93800	221	32	110	16	83	12	20	58	11.6
C94300	186	27	90	13	76	11	15	48	9.0
C94700	345	50	159	23	—	—	35	85	115
C94700(HT)⑦	620	90	483	70	—	—	10	210④	14.8
C94800	310	45	159	23	—	—	35	80	12.0
C94900	262 最小	38 最小	97 最小	14 最小	—	—	15 最小	—	—
C96800	862 最小	125 最小	689 最小⑥	100 最小⑥	—	—	3 最小	—	—

（续）

UNS 编号	抗拉强度		屈服强度[1]		压缩屈服强度[2]		伸长率（%）	硬度[3]HB	电导率（%）
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi			
ASTM B584									
C97300	248	36	117	17	—	—	25	60	5.9
C97600	324	47	179	26	159	23	22	85	4.8
C97800	379	55	214	31	—	—	16	130[4]	4.5

注：HT 表示合金处于热处理状态。

①在载荷的作用下，以 0.5% 的延伸。 ②永久变形为 0.025mm（0.001in）。 ③载荷为 500kgf（1100lbf）。 ④3000kgf（6600lbf）。 ⑤热处理，900℃（1650℉）水淬，590℃（1100℉）回火，再水淬。 ⑥0.2%条件屈服强度。 ⑦760℃（1400℉）固溶退火 4h，水淬，然后 315℃（600℉）时效处理 5h 并空气冷却。

铝青铜和锰青铜的铸造试棒的抗拉强度范围为 450～900MPa（65～130ksi），具体取决于成分，有些铝青铜只有在热处理后才能达到最大抗拉强度。

虽然锰青铜和铝青铜常用于相同的用途，但是锰青铜在铸造过程中处理更为容易。砂型铸件在铸造状态下可获得高达 800MPa（115ksi）的抗拉强度和15%～20% 的伸长率，离心铸件还可能稍高一些。应力消除的温度为 175～200℃（350～400℉）。在强度较低的锰青铜里加入铅可以提高其加工性，但是要以抗拉强度和伸长率为代价。高强度锰青铜的含铅量不应超过 0.1%。虽然锰青铜的硬度范围为 125～250HB，但它们还是易于切削加工的。

在低强度的锰青铜里加入锡可增强其抗脱锌的能力，但是在高强度的锰青铜里的锡含量应以 0.1% 为限，除非其强度和伸长率允许有所牺牲。

锰青铜规定用于船用推进器及其附件、小齿轮、球轴承的滚道、蜗轮、齿轮拨叉以及建筑用途。锰青铜还能用于轧机的下压螺母和滑块、桥梁支铰、齿轮和轴承，所有这些均要求高强度和硬度。

不同的铸造铝青铜含有 9%～14% Al 和较少量的铁、锰或镍。它们有非常窄的凝固范围，故而它们要求有比其他铸造铜合金更为合适的浇、冒口，也就更加难以浇铸。这些合金，特别是经热处理之后能得到很大范围的性能，但必须严格控制其成分。与锰青铜相似，铝青铜也能形成大大超过 700MPa（100ksi）以上的抗拉强度。

大多数的铝青铜含有 0.75%～4% Fe，由此细化晶粒组织和提高强度。含有 8%～9.5% Al 的合金无法进行热处理，除非有超过 2% 的其他元素（如镍和锰）的加入。它们具有高于任何普通锡青铜的抗拉强度、塑性和韧性。用途包括阀座螺母、凸轮轴承、叶轮、酸洗槽吊钩、搅拌器、起重机齿轮和连杆。

可热处理的铝青铜含有 9.5%～11.5% Al，它们还含有铁以及可含可不含的镍或锰。这些铸件以 760～925℃（1400～1700℉）的温度在水或油里淬火，再以 425～650℃（800～1200℉）的温度回火，具体取决于其精确的成分和要求的性能。

从表 3.2-20 所列的性能可以看出，无法从任何一种铝青铜获得所有的最高性能。一般来说，抗拉强度、屈服强度和硬度较高的合金，伸长率的值比较低。硬度较高合金的典型用途为轧机的下压螺母和滑块、蜗轮、轴套、滑板、叶轮、不产生火花的工具、阀门和模具。

铝青铜具有在包括酸洗溶液的许多物质中的耐腐蚀性。当腐蚀发生时，常见的是富铝青铜的选择性侵蚀。双 α 加 β 的铝青铜对于富铝相的选择性侵蚀比全 α 的铝青铜更为敏感。

铝青铜的疲劳极限大大高于锰青铜及任何其他铸造铜合金。不像 Cu-Zn 和 Cu-Sn-Pb-Zn 合金，铝和锰青铜的力学性能并不会随铸件横截面的增加而降低。这是因为这些合金有很窄的凝固范围，于是当铸件有良好的设计和补缩时就能形成较为密实的组织。

尽管锰青铜会在高于 230℃（450℉）的温度里发生热脆性，但铝青铜却能短时间地用于高达 400℃（750℉）的温度里而不会有明显的强度下降。例如，室温下的抗拉强度 540MPa（78ksi）会分别降低到温度 260℃（500℉）的 529MPa（76.7ksi）、400℃（750℉）的 460MPa（67ksi）和 540℃（1000℉）的 400MPa（58ksi）。相应的伸长率则从 28% 分别至 32%、35% 和 25%。

与锰青铜不一样，许多铝青铜经过在铸型里的缓慢冷却，其屈服强度和硬度得到提高而抗拉强度和伸长率却因之下降。尽管有些锰青铜会在缓慢冷却的过程中析出相对较软的相，但铝青铜却能在很窄的温度

范围565~480℃(1050~900℉)内相当快地析出硬组分。因此，缓慢冷却的大型铸件或较小铸件都具有与相对较快冷却的小铸件所不同的性能。在热处理可硬化的铝青铜时，也有同样的现象出现。在淬火之后缓慢冷却通过临界温度范围或者在该范围的温度里回火都将降低伸长率。添加2%~5% Ni可大大削弱这种影响。

镍黄铜、硅黄铜和硅青铜虽然一般强度都高于红金属合金，但是利用更多的还是其耐腐蚀性。

铸造铍铜主要通过改变热处理工况而获得各种不同的性能。“红”铍铜以C82000和C82200为例，而“金”合金包括C82400、C82500、C82600和C82800。铸造合金与其相应的锻造合金相比，一般含有大量的铍。“金”铸造合金特别具有优异的铸造特征，并能以相对较低的温度注入具有复杂形状和细微结构的铸型中。

图3.2-7所示是三种不同的合金用分离铸造试棒经试验所得到的硬度和抗拉强度数据的分布。

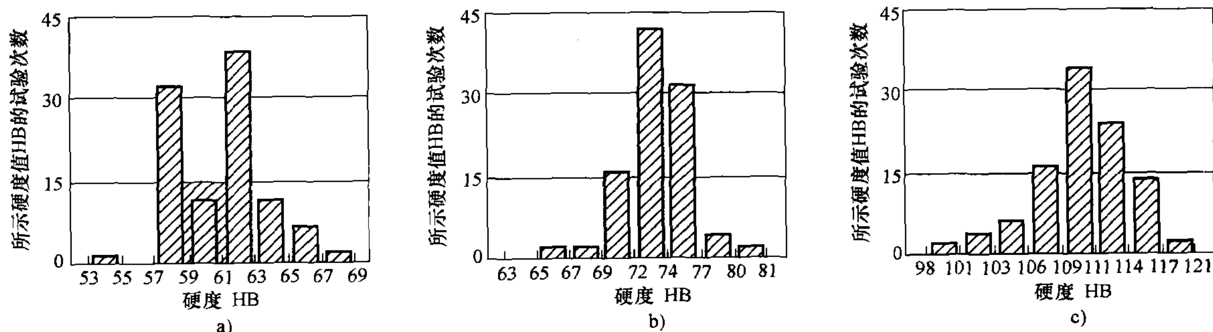


图3.2-7 具有不同抗拉强度的三种同铸件的一百次测试的硬度值分布

a) C83600。抗拉强度235~260MPa(34~38ksi)，载荷500kgf(1100lbf) b) C90300。抗拉强度275~325MPa(40~47ksi)，载荷500kgf(1100lbf) c) C87500。抗拉强度420~500MPa(61~72ksi)，载荷500kgf(3300lbf)

试棒的性能。分离铸造的试棒与那些同生产铸件同时浇铸的试棒在力学性能上常有很大的差别，特别当铸件的厚度明显地不同于试棒时。

锡青铜的力学性能尤其受铸件截面尺寸不同的影响。随着截面尺寸增大到50mm(2in)，铸件本身的力学性能——强度和伸长率——会逐渐低于相应的分离铸造试棒的性能。伸长率受其影响更甚，对于某些锡青铜，截面50mm(2in)的伸长率可以小到只有截面10mm(0.4in)或分离铸造试棒的十分之一。

许多铜合金系的冶金学性质都很复杂的。冷却速度(作为铸件截面的函数)直接影响到晶粒的大小、偏析以及枝晶间收缩，这些因素又影响铸造金属的力学性能。因此，造型技术和浇铸技术都是以冶金学特性和铸件形状为依据的。

尺寸公差

以不同造型方法生产的铸件一般都有不同的尺寸公差。造型工艺对包含在两个或更多型箱里跨越其分型线的尺寸所要求的公差，比整个尺寸都能包容在同一个型箱里的尺寸所要求的公差更大。对于生砂砂型制造的铸件，跨越分型线的公差取决于用于对准上、下型箱位置的定位销及其衬套的精度。

图3.2-8所示是在50件红黄铜的生产铸件上的两个重要尺寸的变化情况。尺寸越大，造成的困难也

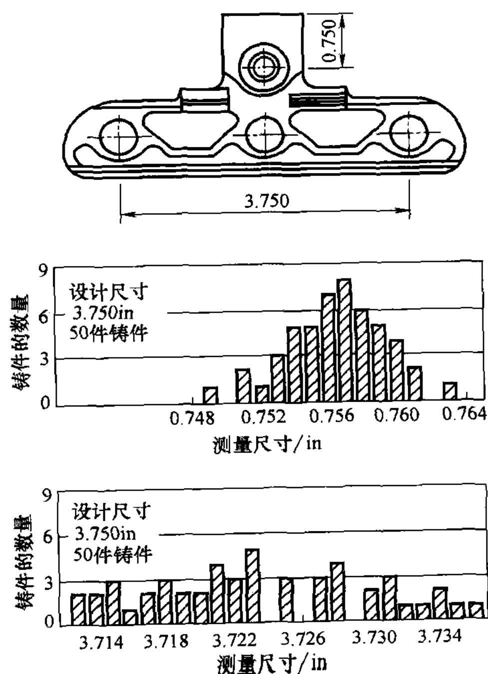


图3.2-8 一种典型红铜铸件的设计尺寸变动情况。零件用同样模型在生砂砂型里铸造而成。图示所有尺寸均以in为单位

越大，50件的生产铸件中没有一件有与设计公称尺寸值一样大的实际尺寸。图3.2-9表示两种相似的带型芯的阀体铸件的尺寸变化情况。每一种设计，各取大约100件对其型芯和铸件上与之相应空腔的尺寸进行测量。这两种设计的铸件上的实际尺寸都小于型芯的尺寸。由此表明，型芯的名义尺寸需要比成品铸件要求的尺寸稍微放大一些，以此确保铸造后的铸件有合适的空腔尺寸。

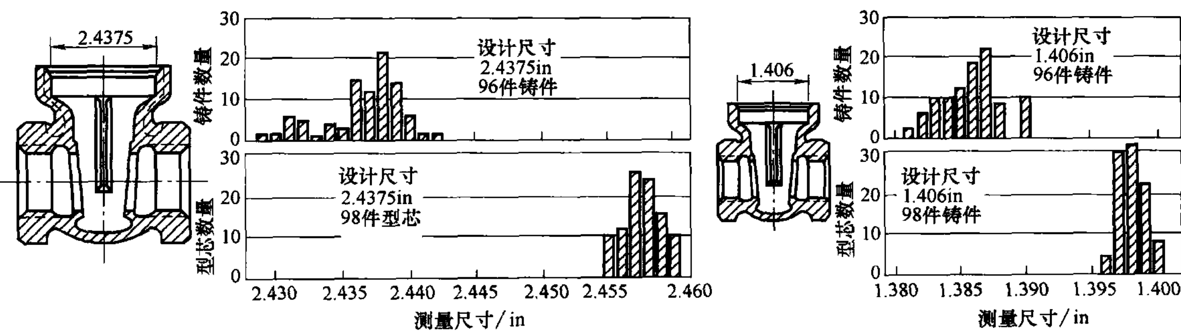


图3.2-9　两种红铜铸造的典型阀体设计尺寸的变动。设计相似、尺寸不同的阀体都用于砂芯制成其内腔。上面的直方图为铸件的尺寸变动，下面的为对应型芯。单位为in

切削性

铸造铜合金的切削性评估与相对应的锻造合金相似。铸造合金可以被分为三组。表3.2-21所示是分别属于这三类合金的切削性。

第一组仅包括含有铅的单一富铜相的铸造合金。

表3.2-21　多种铸造铜合金的切削性评估

UNS编号	普通名称	切削性评估①（%）
第一组：易切削合金		
C83600	铅红铜	90
C83800	铅红铜	90
C84400	铅浅红铜	90
C84800	铅浅红铜	90
C94300	高铅锡青铜	90
C85200	铅黄铜	80
C85400	铅黄铜	80
C93700	高铅锡青铜	80
C93800	高铅锡青铜	80
C93200	高铅锡青铜	70
C93500	高铅锡青铜	70
C97300	铅镍黄铜	70
第二组：中等可切削合金		
C86400	铅高强度锰青铜	60
C92200	铅锡青铜	60
C92300	铅锡青铜	60
C90300	锡青铜	50
C90500	锡青铜	50
C95600	硅-铝青铜	50
C95300	铝青铜	35
C86500	高强度锰青铜	30
C82500	铍铜	30
第三组：难切削合金		
C86300	高强度锰青铜	20
C95200	9%铝青铜	20
C95400	11%铝青铜	20
C95500	镍-铝青铜	20

①表示为相对于易切削黄铜C36000的切削性的百分比。评估依据为等效刀具寿命的相对切削速度。例如评估值为50的材料，应该用类似于切削C36000的速度的一半进行切削。

无论铅的存在是为了改善切削性能还是为了别的什么目的，铅是有利于断屑的，因此能提高切削速度、减少刀具的磨损和改善表面粗糙度。

第二组合金含有两种或两种以上的相。一般而言，第二相比基体更硬或更脆。硅青铜、多种铝青铜和高锡青铜都属于这一组。硬而脆的第二相能起到内

部断屑器的作用，由此形成短屑和易于切削。锰青铜会产生长长的螺旋形切屑，其两面都很光滑且不会断屑。另一方面，有一些铝青铜会产生长长的螺旋形切屑，其两面都很光滑且不会断屑；另一些铝青铜会也产生长长的螺旋形切屑，却因其底面很粗糙而发生断屑，然后像短切屑一样起作用。第二组中的某些合金被归类为中等的切削性，因为当合金在切削时，尽管切屑的形成完全正常但刀具的磨损却较快。

第三组是最难切削的一组，主要包括高强度的锰青铜和有高含量铁或镍的铝青铜。

一般用途合金

一般用途的铸造铜合金常常分为红或黄两类合金。它们的一般性能如表3.2-20所列。

铅红铜和铅浅红铜都适合采用普通铸造工艺，并具有非常高的铸造性。合金C83600是其中最为著称的，常用的名称为85-5-5-5或铜币合金。C83600及其改型C83800(83-4-6-7)构成了最大量的铜基铸造合金。它们用于要求有中等耐腐蚀性、良好切削性、中等的强度和塑性及良好铸造性的场合。C83800的力学性能较低一些，但切削性更佳，而且其初始金属的成本也比C83600低。

C83600和C83800都可用于管件、法兰、供给泵、量仪铸件和零件、一般家用器具或机器附件和夹具、造纸机械、液压和蒸汽阀、阀片和阀座、叶轮、喷头、纪念牌、铜牌、雕塑以及类似的产品。

合金C84400和C84800的铅和锌比C83600和C83800的高，而铜和锡比其低。它们的价格比较低，而抗拉强度和硬度也较低。它们在管道工业中应用最为广泛。

铅黄铜C85200和C85700的价格和力学性能甚至更低。其主要用途为管件及其附件的压铸件、低压阀门、空气和煤气管道接头、一般零件和装饰铸件。一般来说，它们最适用于小零件，厚截面的大型零件应避免使用。在黄铜中加入铝(0.15%~0.25%)能增加其流动性，并得到更为光滑的表面。

所有一般用途的红和黄合金，当制造良好并洁净时都能电镀镍或铬。

不含铅的合金如锡青铜C90500(海军G青铜)和C90300(改型海军G青铜)的切削加工比含铅合金要困难得多。含有10%~12% Sn、1%~2% Ni和0.1%~0.3% P的合金就是所谓的齿轮青铜。加入高达1.5% Pb往往能提高切削性。在C90300中加入铅能提高其切削性，但是需要同时减少锡，以保持其塑性。含铅锡青铜包括C92200(所谓的蒸汽青铜、阀青铜或海军M青铜)和C92300(商用G青铜)。

所有的锡青铜都适用于在比铅红铜或浅红黄铜所能承受的更高运行温度下，并要求具有耐腐蚀、防漏密封或较高强度的所有用途。C92200长期运行的极限温度是290℃(550℉)，由于高锡相的析出所造成的脆化C90300、C90500、C92300的温度是260℃(500℉)。在锡含量低于~8%的锡青铜里，不会发生这种反应。有关处置流体和气体的高温用途，《ASTM锅炉和压力容器规程》的表UNF-23规定了C92200(铅锡青铜,ASTM B61)和C83600(铅红铜,ASTM B62)在不同温度下的许用工作应力(表3.2-22)。

表3.2-22　C92200和C83600铸件的许用工作应力

温度		工作应力			
		ASTM B61①		ASTM B62②	
℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi
38	100	47	6.8	41	6.0
65	150	47	6.8	41	6.0
93	200	47	6.8	40	5.8
120	250	47	6.8	38	5.5
ISO	300	45	6.5	34	5.0
175	350	41	6.0	31	4.5
205	400	38	5.5	24	3.5
230	450	34	5.0	24	3.5
260	500	28	4.0	24	3.5
290	550	23	3.3	24	3.5

①按ASTM B61规定的C92200最小抗拉强度为235MPa(34ksi)。　②按ASTM B62规定的C83600最小抗拉强度为250MPa(34ksi)(原文如此,似为36ksi——译者注)。

引自《ASTM锅炉和压力容器规程》的表UNF-23。

在锡青铜中，常通过加入镍增加密度和防漏密封性。含量超过3% Ni的合金是可热处理的，但是为了优化性能，它们必须含低于0.01%的Pb，C94700(88Cu-5Sn-2Zn-5Ni)就是这种合金的一个例子。

轴承和磨损特性

很久以来，铜合金就被作为轴承使用，因为它们具有中至高的强度、耐腐蚀性和自润滑的综合性能。合金的选择则是取决于对耐腐蚀性和疲劳强度的要求、支承材料的刚性、润滑、轴承材料的厚度、载荷、旋转速度、气氛条件以及其他因素。铜合金可以铸成滑动轴承、浇铸在钢的轴套上、浇铸在滚带上、制成烧结的粉末冶金型材或压制烧结在支承材料上。

有三组合金可以作为轴承和耐磨材料的应用：磷

青铜(Cu-Sn-P)，铜-锡-铅(低锌)合金，以及锰、铝和硅青铜。

磷青铜(Cu-Sn-P或Cu-Sn-Pb-P合金)的残留磷含量从万分之几(用于氧还原和轻度硬化)一直到能形成硬度很高的最高量1%。镍的加入可细化晶粒的大小和使铅得以分散。铜锡轴承具有高耐磨性、高硬度以及从中至高的强度。合金C90700也广泛应用于齿轮，通常称之为齿轮青铜。

含锡量更高的磷青铜如C91100和C91300都用于桥梁支承转台，承受高的载荷和慢的旋转速度。C91100(16% Sn)的最高能承受的载荷是17MPa(2500ksi)，而C91300(19% Sn)为24MPa(3500ksi)。这些青铜的高磷含量(最高1%)使其获得高硬度，而低含锌量(最高0.25%)可以防止发生咬死。它们是非常脆的，为此有时用锰青铜或铝青铜代替它们。

高铅锡青铜适用于在低至中速、载荷不超过5.5MPa(800psi)并要求使用软金属的用途。这类合金包括C93200和C93700。前者即83-7-7-3，是非常优良的通用轴承合金，它特别适合润滑不足的一些用途。合金C93200广泛应用于机床、电器和铁路设备、轧钢设备以及汽车用途。它是用连铸工艺进行生产的，并已代替砂型铸造用于大批量地生产高质量的轴承。合金C93800(15% Pb)和C94300(24% Pb)用于需重载，且处于润滑很差甚至无润滑的情况；在遭受腐蚀的场合如采矿设备(泵和车辆轴承)；或尘土飞扬的环境如碎石场和水泥厂。这些合金用于代替锡青铜或低铅锡青铜，其工况条件不适用仅含极少甚至不含铅的合金。它们也是用连铸工艺生产的。

高强度锰青铜有很高的抗拉强度、硬度和抗冲击性。其典型的用途有大型齿轮、桥梁支承转台(缓慢运动并高压)、高射炮滚道和大炮的后坐力零件。

含8%~9% Al的青铜广泛用于轻载或高速机械里的轴套和轴承。含11% Al的铝青铜铸造后，无论热处理与否都适合于重载(例如气门导套、轧机轴承、螺旋下压螺母和滑块)和精密机械中的用途。当铝的含量增加到11%以上时，硬度随之提高，而伸长率则会下降。这些青铜能很好地适用于导轨和校直板，以防发生过度磨损。含量超过13% Al的铝青铜的硬度超过300HB，但会变脆。这些合金适用于模具和其他不承受冲击载荷的零件。

铝青铜的疲劳极限一般比锰青铜高得多，并更不易发生拉伤。另一方面，锰青铜在保持相当的抗拉强度的同时，还能有很高的韧性，并不需要热处理。

导电、导热率

任何铸件的导电、导热率都比具有相同成分的锻压金属的低，铜铸件针对其载流容量而应用于电机工业上，并由于其高导热率而应用于熔化炉和精炼炉上的水冷零件。然而对于完好并至少85%的电导率或导热率的铜铸件，必须对其熔化和浇铸多加注意。普通的脱氧剂(硅、锡、锌、铝和磷)不能使用，因为即使很少的残留量，也会使电导率和导热率急剧下降。而硼化钙或锂有助于生产具有高传导率的完好铸件。

铸造铜较软且强度低。由含硅、钴、铬、镍和铍的不同组合而得到的合金，经过热处理可以提高其强度和硬度并保持良好的传导性。然而，这些合金不但昂贵，而且还比一些标准化合金更不易获到。表3.2-23列出经热处理的这些合金的一些性能。

表3.2-23　经热处理的高强度和高传导性铸造铜合金的成分及主要性能

UNS编号	名义成分	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	硬度	电导率，%IACS
		MPa	ksi	MPa	ksi			
C81400	99Cu-0.8Cr-0.06Be	365	53	250	36	11	69HRB	70
C81500	99Cu-1Cr	350	51	275	40	17	105HB	85
C81800	97Cu-1.5Co-1Ag-0.4Be	705	102	515	75	8	96HRB	48
C82000	97Cu-2.5Co-0.5Be	660	96	515	75	6	96HRB	48
C82200	98Cu-1.5Ni-0.5Be	655	95	515	75	7	96HRB	48
C82500	97Cu-2Be-0.5Co-0.3Si	1105	160	1035	150	1	43HRC	20
C82800	96.6Cu-2.6Be-0.5Co-0.3Si	1140	165	1070	155	1	46HRC	18

成本考量

在铜合金铸件的设计过程中，铸造人员和设计工程师往往要选择一种内腔的生产方法，在对有型芯和无型芯的设计进行选择时，并没有一般性的规则可循。而成本分析能决定哪一种是较为经济的铸件生产

方法，尽管这也常常是凭经验做出的抉择。

例如对采用有芯铸件或切削加工铸件(即不用型芯制造内腔)的两种方法生产一种小阀片(13mm 或½in)的成本进行比较。切削加工铸件成本只有用干砂芯制造的同样铸件成本的 78%——即较为有利的切削加工铸件可节省 22%。类似的例子为生产一种较大的阀片(38mm 或 1½in)，有芯铸件仅需最少切削加工量，其整体成本比生产切削加工的同样阀片节省成本 8% 以上。因此在考虑两种密切相关零件的所有成本因素时，将存在制造经济性的差异。

第5节 铜的粉末冶金制品

铜基粉末冶金(P/M)产品在数量上仅次于铁和钢排位第二。按照粉末冶金工业联盟(MPIF)的估计，1996 年北美的铜和铜基合金粉末产量为 ~20500t (23000 美吨)，欧洲的估计为 ~14000t(15600 美吨)，而日本的为 ~6200t(7000 美吨)。

铜在 P/M 工业上的应用可以追溯到 20 世纪 20 年代，当时美国通用汽车在其研究所独立开发成功工业用的多孔青铜轴承。这种自润滑轴承至今仍构成 P/M 铜和铜合金应用的主要部分。铜和铜基 P/M 材料的其他重要用途包括摩擦材料、电刷、过滤器、结构零件、电工零件、作为铁粉的添加剂(起合金和渗透作用)、催化剂、油漆和颜料。

一般来说，接近全(理论)密度的铜和铜合金 P/M 结构零件的物理和力学性能，都可以与具有相似成分的铸造和锻造铜基材料的相媲美。然而，P/M 铜零件的密度是在从自润滑轴承或过滤器的低密度直到电工零件的全密度的范围里变化的。它们的物理和力学性能在很大程度上取决于其密度占理论密度的百分比。

粉末的生产和性质

铜粉

99+%纯度的铜粉在工业上是可行的。生产这种铜粉有四种主要方法，即：

- 喷雾法；
- 氧化物还原；
- 湿法冶金学；
- 电解法。

其中，喷雾法和氧化物还原法是目前世界上大量使用的方法。从 20 世纪 80 年代初以来，在美国都没有制造过湿法冶金铜粉和电解铜粉，故不予做进一步的介绍。然而有关用湿法冶金学和电解法生产铜粉的内容可以查阅《ASM 手册》第 7 卷：粉末冶金技术及应用。

表 3.2-24 所示是用四种生产工艺制造的工业用铜粉的一些基本粉末特征比较。每一种工艺都有所生产的独特颗粒形状和表面积。

表 3.2-24 工业用铜粉的特征

粉末种类	成分			颗粒形状	表面积
	铜	氧	酸性不溶物		
电解法	99.1~99.8	0.1~0.8	0.03 最高	枝晶状	中至高
氧化物还原	99.3~99.6	0.2~0.6	0.03~0.1	不规则，疏松	中
水喷雾	99.3~99.7	0.1~0.3	0.01~0.03	不规则至球形，实心	低
湿法冶金	97~99.5	0.2~0.8	0.03~0.8	不规则的团状	非常高

喷雾法。用这个方法就是让熔化的铜流经一个耐熔的喷嘴，其液流受到水或气体的冲击喷射而雾化成为微小的液滴。液滴经固化成为粉末颗粒。这些粉末颗粒的大小和形状受制于雾化的介质、压力和流速。气体雾化会产生球状颗粒，通过控制水的喷射与金属液流之间的相互作用(见图 3.2-10)，可以将水雾化的

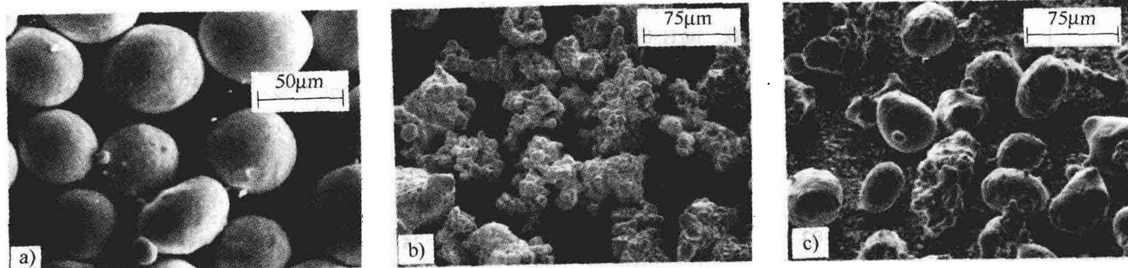


图 3.2-10 气体雾化和水雾化粉末的扫描电镜照片

a) 氮气雾化 b) 水雾化，表观密度 3.04g/cm³ c) 水雾化，表观密度 4.60g/cm³

粉末颗粒从近似圆形到不规则的形状之间进行控制。较高的压力和较慢的流速有利于粉末的细化，平均的颗粒尺寸可以小于325筛目(45μm)。

水是首选用于铜粉生产的雾化介质。雾化粉末常要经过高温的还原(还原任何在雾化过程中形成的氧化物)和团聚处理，以此提高其压实性。表3.2-25表明工业水雾化铜粉的典型性质。

氧化物还原。这个工艺包括将铜(铜的颗粒废料、电解铜、雾化铜等)氧化和将氧化物碾磨成粉末。在高温下，利用固体或气体还原剂对氧化物粉末进行还原，再将形成的烧结块碾磨成粉末。通过对开始的氧化物和经还原的烧结块的碾磨来控制颗粒的大小。碾磨后的铜粉颗粒是不规则的和疏松的(见图3.2-11)。通过控制还原条件，可以获得很大范围的孔隙特征。

表3.2-25 工业水雾化铜粉的性质

铜(%)	化学性质(%)		物理性质							
	氢损	酸性不溶物	霍尔流速(Hall flow rate,金属粉末流速)/(s/50g)	表观密度/(g/cm³)	泰勒筛分析(Tyler sieve analysis)(%)				
					+100	-100+150	-150+200	-200+325	-325
99.65①	0.28	—	—	2.65	微量	0.31	8.1	28.2	63.4
99.61①	0.24	—	—	2.45	0.2	27.3	48.5	21.6	2.4
99.43①	0.31	—	—	2.70	微量	0.9	3.2	14.2	81.7
>99.1②	<0.35	<0.2	~50	2.4	<8	17~22	18~30	22~26	18~38

①水雾化加还原。 ②含镁。

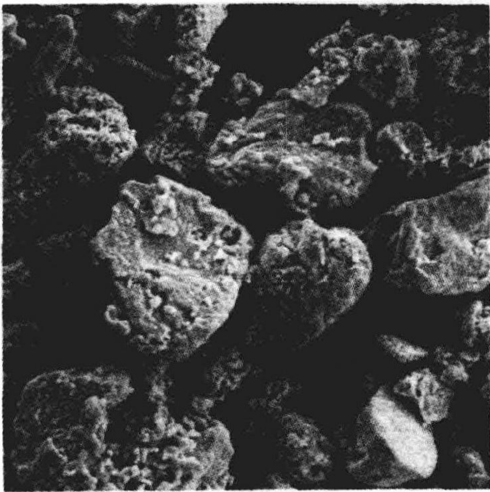


图3.2-11 氧化-还原铜粉。500×

颗粒的大小、形状和孔隙特征决定了粉末以及用于生产的零件的压实性质。表3.2-26所示是用氧化-还原工艺生产的工业铜粉的典型性质。

铜合金粉末

合金粉末可以有不同的成分，包括黄铜、锌白铜、锡青铜、铝青铜和铍青铜。合金粉末用下列的一种方法进行生产。

表3.2-26 用氧化-还原工艺生产的铜粉末的工业等级及其性质

铜	化学性质(%)					物理性质								压实性质		
	锡	石墨	润滑剂	氢损	酸性不溶物	表观密度/(g/cm³)	霍尔流速(Hall flow rate,金属粉末流速)/(s/50g)	泰勒筛分析(%)					烧结前密度/(g/cm³)	烧结前强度/MPa(psi)	
								+100	+150	+200	+325	-325		165MPa (12tsi)	6.30g/cm³
99.53	—	—	—	0.23	0.04	2.99	23	0.3	11.1	26.7	24.1	37.8	6.04	6.15(890)	—
99.64	—	—	—	0.24	0.03	2.78	24	—	0.6	8.7	34.1	56.6	5.95	7.85(1140)①	—
99.62	—	—	—	0.26	0.03	2.71	27	—	0.3	5.7	32.2	61.8	5.95	9.3(1350)①	—

（续）

铜	化学性质（%）					物理性质							压实性质		
								泰勒筛分析（%）						烧结前强度/MPa(psi)	
	锡	石墨	润滑剂	氢损	酸性不溶物	表观密度/(g/cm^3)	霍尔流速(Hall flow rate，金属粉末流速)/(s/50g)	+100	+150	+200	+325	−325	烧结前密度/(g/cm^3)	165MPa (12tsi)	6.30g/cm^3
99.36	—	—	—	0.39	0.12	1.56	—	0.1	1.0	4.9	12.8	81.2	5.79	21.4(3100)①	—
99.25	—	—	—	0.30	0.02	2.63	30	0.08	7.0	13.3	16.0	63.7	—	—	8.3(1200)①
90	10	—	0.75	—	—	3.23	30.6	0.0	1.4	9.0	32.6	57.0	6.32	—	3.80(550)
88.5	10	0.5	0.80	—	—	3.25	12②	—	—	—	—	—	—	—	3.6(525)

①测量时仅模具壁有润滑剂。 ②卡尼流（Carney flow）。

- 将铜粉末与其他的元素粉末，如锡、锌或镍进行预混合处理；
- 在粉末的生产过程中，进行预合金化处理。

预混合处理法。预混合粉末是一种选定成分的混合物，视情况加入润滑剂，在烧结的过程中形成所要求的合金。最普通的预混合 P/M 铜合金就是用于自润滑轴承的锡青铜。典型的青铜成分是 90Cu-10Sn，通常还含有高达 1.5% 的石墨。某些“稀释”青铜轴承还有不同含量的铁，用于替代一些铜和锡。铜-铅和用钢加衬的铜-铅-锡的两种材料都可用于替代整体青铜轴承，它们均采用预混合粉末，因为铅在铜中实际上是不可溶的，故不能进行预合金化处理。用于制动器和离合器的摩擦材料含有完全不同的材料，例如铜与若干种其他组分像铅、锡、铁、石墨、二硫化钼、氧化物等，这些只能用预混合粉末制造。

预合金处理法。预合金化的粉末生产一般是先将组分熔化形成均质的合金，再将熔化的合金以与生产铜粉相似的方法进行喷雾。它们也可以将预混合粉末烧结和再将其碾磨来达到所要求的粉末特征。

黄铜和锌白铜。气体雾化一般用于制造黄铜和锌白铜的预混合金化粉末，并应用于高密度（>7.0g/cm^3）的零件。这些成分的合金熔液具有低表面张力的特点，使颗粒有充分的不规则形状，以使粉末更具压实性（见图 3.2-12）。对于黄铜和锌白铜的标准 P/M 牌号，氧化物的还原并非必不可少。

工业预合金化黄铜和锌白铜粉末的加铅和不加铅

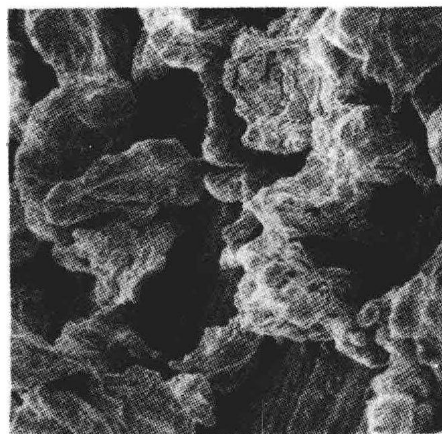


图 3.2-12 经预合金处理并气体雾化的锌白铜粉末（63Cu-18Ni-17Zn-2Pb）

成分都是可行的。工业黄铜合金的范围从 90Cu-10Zn 到 65Cu-35Zn。其中加铅的 80Cu-20Zn 和 70Cu-30Zn 就是用于制造烧结结构零件的两种最普通的合金，这些零件可以要求进行二次切削加工工序。惟一工业用锌白铜粉末的名义成分就是 65Cu-18Ni-17Zn，若需要的话，可以通过加铅来改善其切削性。

青铜。预合金化青铜粉末并未广泛应用于结构零件的制造，因为它们的标准颗粒型式和高表观密度会导致未烧结的强度的降低。然而，由这种粉末与不规则铜粉末和磷-铜组成的混料却能生产出具有良好力学性能的烧结零件。

表 3.2-27 列出了工业牌号的预合金化黄铜、青铜和锌白铜粉末的典型性质。

表 3.2-27 典型合金成分的黄铜、青铜和锌白铜的性质

性质	黄铜①	青铜①	锌白铜①②
筛析(%)			
+100 目	2.0 最大	2.0 最大	2.0 最大
-100 +200	15~35	15~35	15~35
-200 +325	15~35	15~35	15~35
-325	60 最大	60 最大	60 最大
物理性质			
表观密度	3.0~3.2	3.3~3.5	3.0~3.2
流速/(s/50g)	24~26	—	—
力学性能			
在415MPa(30tsi)条件下烧结前密度③/(g/cm³)	7.6	7.4	7.6
在415MPa(30tsi)条件下烧结前强度③ MPa(psi)	10~12 (1500~1700)	10~12 (1500~1700)	9.6~11 (1400~1600)

①名义筛目大小，黄铜，-60 目；青铜，-60 目；锌白铜，-100 目。 ②不含铅。 ③用0.5%硬脂酸锂润滑的粉末的压缩性和烧结前强度数据。

零件的生产

粉末的压实

铜和铜合金粉末一般都是在密封的模具中进行冷压实的，模具由施加所需压力的上、下凸模构成。在冷压实的过程中，粉末颗粒相互机械地嵌锁在一起。典型的压实密度为材料理论密度的80%~90%。当要求较高的密度时，就得采用像热压、挤压、热等静压和热锻造的一些固化方法。

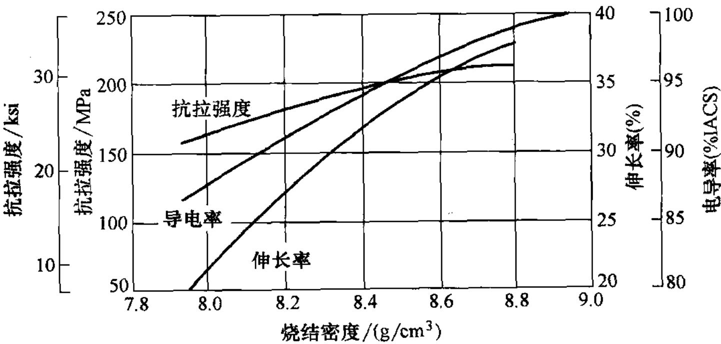


图 3.2-13 P/M 铜的密度对导电性和拉伸性能的影响

烧结

经过压实的零件在高温中烧结，并在保护气氛中防止发生氧化。在此过程里，粉末颗粒以冶金方式相互粘结在一起。下面将介绍铜 P/M 零件生产所用的典型烧结时间和温度。

纯铜P/M 零件

纯铜 P/M 零件因为其高导电性主要用于电工和电子领域里。在烧结的过程中必须使用非常纯净的铜粉(纯度≥99.95%)或促成可溶性的杂质析出。铜固溶体中少到0.023%Fe 的极少含量，也会使电导率降低到纯铜的86%。铜粉中若机械地混有少量的铁，将使电导率下降到更低，除非铁能在烧结中溶解在铜里。如果使用高纯度的铜或可溶解的杂质在烧结中析出，就有可能得到如图 3.2-13 所示的强度和电导率值。

电导率与疏松度有直接关系，孔隙含量越大(即密度越低)电导率也越低。用 205 ~ 250MPa(15 ~ 18tsi)的中等压力压制的纯铜零件并在 800 ~ 900℃(1500 ~ 1650℉)温度下烧结后，得到的电导率是以固态退火铜的电导率为100%国际退火铜标准(IACS)的80%~90% IACS。通过在较高的温度如 930 ~ 1030℃(1700 ~ 1900℉)烧结所压制的零件，随后对其进行再次压制、压型或锻造，由此得到的 P/M 铜能达到或接近固态铜的电导率。

要求高电导率的纯铜零件的典型用途包括整流环、接触器、短路环、整流罩和扭转型电插头。铜粉还用于具有低电阻率、高载流量和高热导率的铜-石墨制品。典型的用途包括电动机和发电机的电刷、变阻器的滑动零件、开关以及载流垫片。

青铜P/M 零件

粉末冶金青铜一般是用单质的铜和锡粉末所构成的预混合料，再加入0.5%~0.7%的干有机润滑剂，如硬脂酸或硬脂酸锌制作的。然而一些密度大于7.0g/cm³ 的结构零件是用预合金化粉末制造的。预

合金化粉末具有比预混合粉末更高的屈服强度和加工硬化速率。因此，预合金化粉末要达到规定的烧结前密度所需要的压力载荷高于作为单质粉末所要求的压力。预混合和预合金化粉末在压力特征上的不同如图3.2-14所示。

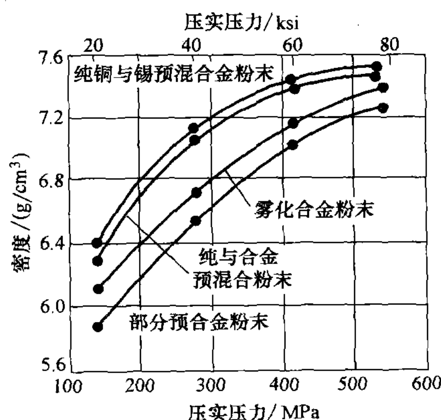


图3.2-14 90Cu-10Sn预混合和预合金粉末的压力特征

用于青铜的典型烧结炉温度范围一般为815～870℃(1500～1600℉)，在热区内总的烧结时间为15～30min并取决于所选定的温度、所要求的尺寸变化以及最重要的即一种优化的α青铜晶粒结构的存在。烧结的气氛应当是保护性和还原性的，这样有利于烧结。包围在每一颗铜粉末颗粒外面的氧化铜以及氧化锡的还原，使得扩散速度得到提高。图3.2-15所示是添加石墨和不添加剂石墨的90Cu-10Sn烧结青铜的典型的强度/密度数据。通过调节烧结时间和/或温度，控制预混合系统的烧结尺寸。

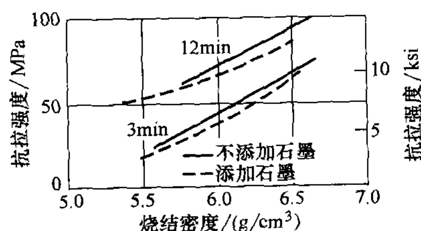


图3.2-15 密度对铜-锡和铜-锡-石墨压实块强度的影响

一般来说，用相对较粗糙粉末构成的铜-锡混合料而不是一种较细粉末构成的混合料的烧结来提高其价值。在粉末混合料经过试验和调整来得到一近似的目标尺寸以后，在烧结生产过程中还要进行最终的调整，这样才能达到尺寸精度。影响最终尺寸数值的因素包括组分的物理性质和压实密度。

轴承。自润滑疏松青铜轴承仍在消耗每年生产的大部分铜粉末。这些轴承都是通过压制铜和锡的单质粉末混合料，并继之以烧结而制成的。应用最广泛的轴承材料为90Cu-10Sn青铜，常还要加入高达1.5%的石墨。所谓的稀释青铜轴承有不同含量的铁。用铁稀释就是以某些性能的降低为代价而达到降低成本的目的。

用于青铜粉末的压实压力范围是从近140～415MPa(20～60ksi)。一般是在连续网带炉中介于815～870℃(1500～1600℉)的温度里经历约3～8min完成烧结的。一般炉内使用的气氛为氨分解或吸热型气体。为了得到能重复生产的烧结结果，重要的是严格控制时间和温度，这是基于它们对于均质化工艺所产生的动力学影响，并由其决定在烧结期间发生的尺寸变化。大部分的轴承都要进行精整来提高尺寸精度，一般精整压力范围为近200～550MPa(30～80ksi)。轴承可以为干的或饱含油的形式出售。利用真空浸透工艺让孔隙充满油。大部分普通轴承的密度范围为：干的为5.8～6.6g/cm³，或浸透油的为6.0～6.8g/cm³。这个范围对应于近25%～35%的孔隙体积。

青铜轴承最普通的形状就是简单的或带法兰的衬套，但有些还有球形的外表面。尺寸范围从直径大约0.8～75mm(1/32～3in)。烧结的青铜轴承用于汽车零件，家用器具，农场、割草机和园艺设备，电子设备，办公设备、工业设备以及便携式电动工具。

过滤器。过滤器是疏松P/M零件的主要用途之一。用金属粉末制造过滤器的主要缘由就是它具有严格控制疏松度和孔隙大小的能力。大部分非铁过滤器的生产商都首选雾化的球状粉末，而且其颗粒的大小可以严格控制，从而使生产的过滤器处在所要求的疏松度范围之内。过滤器的有效疏松大小范围一般为5～125μm。

锡青铜是应用最广泛的P/M过滤材料，但锌白铜、不锈钢、铜-锡-镍合金和镍基合金也可以用。P/M青铜材料相对于其他疏松材料的主要优点是成本低廉。疏松P/M青铜过滤器能达到的强度范围为20～140MPa(3～20ksi)和达20%伸长率的合适塑性。P/M青铜具有与相同成分的铸造青铜一样的耐腐蚀性，因此能在很广的环境范围里使用。

青铜过滤器通常借助球状青铜粉末的重力烧结技术进行制造的，其粉末一般采用雾化预合金青铜的熔液方法制造。这种青铜一般含有90%～92% Cu和8%～10% Sn。雾化青铜过滤器经烧结后的密度范围为5.0～5.2g/cm³。为了能在给定最大孔隙尺寸的条件下生产得到透气度最高的过滤器，必须使用颗粒大小一致的粉末。

粉末冶金的青铜过滤器通常用于过滤气体、油、冷冻液和化学溶液。它们也在飞船的流体系统中用于去除小至1μm的颗粒。青铜膜片还能用于从不曾被乳化的液体或液体混合物里分离出空气。只有能湿润孔隙表面的液体，才能透过疏松的金属零件。

青铜过滤材料还能作为灭火器用于运行在可燃性气氛中的电气设备里，这时具有高导热性的青铜可防止发生点火。它们还可以作为排气管用于灌装可燃性液体的储罐里。在这些用途中，由于热量迅速传导离散，因此总也达不到其点火温度。

结构零件。在结构用途中，常选用青铜粉末冶金零件是由于青铜的耐腐蚀性和耐磨性。它们一般都采用类似于制造自润滑轴承的方法进行生产，并且一般用于汽车离合器、复印机、外装电动机和喷漆设备。青铜结构零件（CT-1000）的典型成分如表3.2-28所示，其典型的性能如表3.2-29所示。

表3.2-28　铜基P/M结构零件的典型成分

材料代号	化学成分（质量分数，%）					
	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	微量元素
CZ-1000	88.0	余量	—	—	—	最少
	91.0	余量	—	—	—	最多
CZP-1002	88.0	余量	1.0	—	—	最少
	91.0	余量	2.0	—	—	最多
CZ-2000	77.0	余量	—	—	—	最少
	80.0	余量	—	—	—	最多
CZP-2002	77.0	余量	1.0	—	—	最少
	80.0	余量	2.0	—	—	最多
CZ-3000	68.5	余量	—	—	—	最少
CZ-3000	71.5	余量	—	—	—	最多
CZP-3002	68.5	余量	1.0	—	—	最少
	71.5	余量	2.0	—	—	最多
CNZ-1818	62.5	余量	—	—	16.5	最少
	65.5	余量	—	—	19.5	最多
CNZP-1816	62.5	余量	1.0	—	16.5	最少
	65.5	余量	2.0	—	19.5	最多
CT-1000	87.5	余量	—	9.5	—	最少
	90.5	余量	—	10.5	—	最多

注：总量最多相差2%，其中还包括其他为特定目的而加入的微量元素。

引自：MPIF标准35（1997年版）。

表3.2-29　铜基P/M结构零件的性能

材料代码①	最小屈服强度		典型值：抗拉强度		典型值：0.2%条件屈服强度		典型值：25mm（1in）长的伸长率（%）	典型值：弹性模量		典型值：横向断裂强度		无凹槽夏比冲击吸收功		压缩屈服强度（0.1%）		密度/（g/cm³）	表观硬度HRH
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi	MPa	ksi	J	lbf·ft	MPa	ksi		
CZ-1000-9	60	9	120	17	70	10	9.0	80	12	270	39	20	14.8	80	12	7.6	65
CZ-1000-10	70	10	140	20	80	12	10.5	90	13	320	46	33	24.3	80	12	7.9	72
CZ-1000-11	80	11	160	23	80	12	12.0	100	14.5	360	52	42	31.0	80	12	8.1	80
CZP-1002-7	50	7	140	20	60	9	10.0	90	13	310	45	33	24.3	70	10	7.9	66
CZ-2000-11	80	11	160	23	90	13	9.0	—	—	360	52	37	27.3	—	—	7.6	73
CZ-2000-12	80	12	240	35	120	17	18.0	—	—	480	70	61	45.0	—	—	8.0	82
CZP-2002-11	80	12	160	23	90	13	9.0	85	12.3	360	52	37	27.3	80	12	7.6	73
CZP-2002-12	80	12	240	35	120	17	18.0	100	14.5	480	70	61	45.0	100	14.5	8.0	82
CZ-3000-14	100	14	190	28	110	16	14.0	80	12	430	62	31	22.9	120	17	7.6	84
CZ-3000-16	110	16	230	33	130	19	17.0	90	13	590	86	52	38.4	130	19	8.0	92
CZP-3002-13	90	13	190	28	100	14.5	14.0	80	12	390	57	16	11.8	80	12	7.6	80

（续）

材料代码①	最小屈服强度		典型值										无凹槽夏比冲击吸收功		压缩屈服强度（0.1%）		密度/(g/cm³)	表观硬度HRH
			抗拉强度		0.2%条件屈服强度		25mm(1in)长的伸长率	弹性模量		横向断裂强度								
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)	GPa	10^6psi	MPa	ksi		J	lbf·ft	MPa	ksi		
CZP-3002-14	100	14	220	32	110	16	16.0	90	13	490	71		34	25.0	100	14.5	8.0	88
CNZ-1818-17	120	17	230	33	140	20	11.0	95	13.8	500	72.5		33	24.3	170	25	7.9	90
CNZP-1816-13	90	13	180	26	100	14.5	10.0	95	13.8	340	49		50	36.9	120	17	7.9	86
CT-1000-13(再压)	90	13	150	22	110	16	4.0	60	8.7	310	50		5	3.7	140	20	7.2	82

①代码中最后数字代表最小强度值，单位为 ksi。

引自：MPIF 标准35(1997版)。

黄铜和锌白铜P/M零件

对照青铜结构零件，用黄铜、铅黄铜和锌白铜制造的零件都是用预合金雾化粉末制造的。表3.2-28列出一些普通黄铜和锌白铜合金的成分。加铅的成分则用于所有要求有二次切削加工工序的情况。

合金粉末通常要与0.5%~1.0%(质量分数)的润滑剂相混合。硬脂酸锂因其在烧结过程中有净化和精炼作用而作为首选润滑剂。然而双润滑剂系统，例如硬脂酸锂和硬脂酸锌也是普通所用的，它们可以将由过量硬脂酸锂引起的表面污渍减少到最低限度。经润滑的粉末一般在207MPa(30ksi)的压力下压实到理论密度的75%，在415MPa(60ksi)的压力下压实到理论密度的85%。

黄铜和锌白铜的压实块的烧结通常在保护气氛中进行。氨分解、吸热气体和氮基气氛是最常用的保护气氛。所用的温度范围依据合金成分从815~925℃(1500~1700℉)。为了防止压实块的扭曲和/或结疤，烧结温度不应超过合金的固相线温度。通过多次的压制和烧结工序，能达到相应的锻压合金的屈服强度和硬度。为了在烧结中尽量减少锌损，可以有适当的润滑剂损耗，应使用保护烧结盘的装置。表3.2-29中列有普通黄铜和锌白铜P/M零件的典型性能。

黄铜、锌白铜是仅次于青铜轴承最广泛用于P/M结构零件的材料。典型的用途包括锁具零件和锁舌、照相机快门机构、齿轮、凸轮、定时装置和小型发电机驱动装置中的促动杆，以及装饰用的饰件和浮雕。在许多的这些用途里，耐腐蚀性、耐磨性和装饰性外观都起重要的作用。

铜-镍P/M零件

含有75Cu-25Ni和90Cu-10Ni的铜镍P/M合金的开发是为了能用于硬币和耐腐蚀的用途。用772MPa(112ksi)压制的75Cu-25Ni合金粉末压实块所具有的烧结前密度为理论密度的89%。在氨分解中经过1090℃(2000℉)温度的烧结，其伸长率为14%和表观硬度为20HRB。再用772MPa(112ksi)进行压制，可提高密度到95%。这种合金有与不锈钢一样的颜色，还能抛光到很高的光泽。90Cu-10Ni合金在相似的压力和烧结条件下，最终可达到99.4%的密度。它具有光亮青铜的颜色并也能抛光到很高的光泽。

有一种生产硬币、徽章和奖牌方法，将75%Cu和25%Ni粉末的混合物与硬脂酸锌润滑剂调和在一起，进行压制、烧结、压型和再烧结，以此生产得到耐冲击的坯料。因为这种坯料是使用高纯度的材料生产的，故它们比轧制的坯料要软。所以它们能用相对较低的压力压型，为此有可能获得较为清晰的轮廓深度和较小的模具磨损。

在另一种的工艺过程中，在铜或铜-镍粉末中混入一种有机结合剂，并轧制成“未经烧结”的薄板。随后将单独的铜薄板和铜镍薄板压制在一起成为夹层板，再将其冲成坯料。然后将坯料置于氢气中加热，用于除去有机结合剂，并对材料进行烧结。“未经烧结”的坯料的密度很低(理论的45%)，但通过轧制可提高到97%，经过压制之后，将坯料退火，以此提高其塑性和压型性。

铜-铅P/M零件

铜和铅在其相互间的溶解度是很有限的，很难用

传统的铸锭冶金技术进行合金。铜-铅混料有优异的冷态压制性能，它们能用低至76MPa(11ksi)的压力压实达到高至80%的理论密度。经过烧结，经152MPa(22ksi)压力的再次压制，便能生产得到基本上无疏松的轴承。

钢衬的铜或铜-铅-锡 P/M 材料有时用于替代实体的青铜轴承。其生产过程为：将粉末喷洒到钢带上并达到预定的厚度，进行烧结，轧制到理论密度，再度烧结，最后退火。其最终产品的残余疏松度为不到0.25%。从这种双金属带上裁剪下尺寸合适的坯料，进行成形加工，然后钻出油孔或通过加工形成适当的沟槽。这种材料包括 Cu-25Pb-0.5Sn、Cu-25Pb-3.5Sn、Cu-10Pb-10Sn 和 Cu-50P-1.5Sn 合金。

铜基P/M摩擦材料

经烧结的金属基摩擦材料应用于包括借助摩擦传递运动(离合器)，以及用于减速和停止运动(制动器)的用途。在这些用途中，机械能转变成摩擦热，这些热又为摩擦材料所吸收和驱散开来。将铜基材料作为首选是因为其高导热性，然而现已成功开发一种廉价的铁基材料，可应用于从中等到重载的干摩擦用途。

大部分的摩擦材料含有铜粉并混有其他金属粉、固体润滑剂、氧化物及其他化合物。这些组分相互间不溶混，故只能用粉末冶金的方法制造。表3.2-30所列是一些普通的铜基摩擦材料的成分。

表3.2-30　一些普通的铜基摩擦材料的成分

化学成分(质量分数,%)							应用①
Cu	Sn	Fe	Pb	石墨	MoS_2	其他	
60~75	4~10	5~10	—	3~10	3~12	2~7SiO_2	D
52.5	—	—	7.5	—	—	5SiO_2，15Bi	W
72	4.7	3.3	3.5	8.7	1.4	1.9SiO_2，0.2Al_2O_3	W，D
72	7	3	6	6	—	3SiO_2，4MoO_3	D
62	7	8	12	7	—	4砂	D
74	3.5	—	—	16	—	2Sb，4.5SiO_2	D

①W，湿；D，干。见图3.2-16。

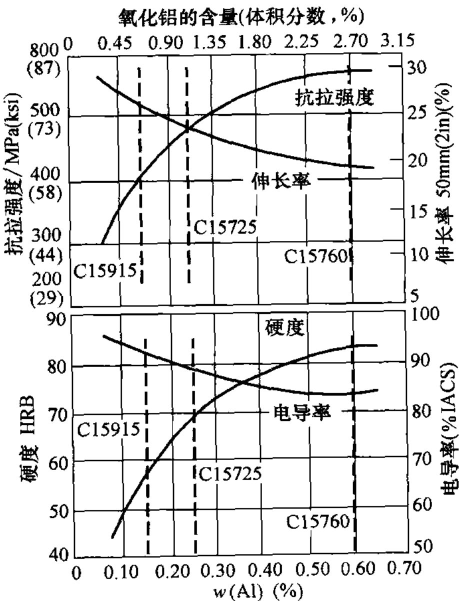


图3.2-16　三种ODS铜的性质

利用一些合适的粉末混合剂，经仔细混合以使组分的偏集尽可能地小。为得到强度高、导热性好的基体，有必要使用有高表面积的细金属粉末。将经混合的粉末进行压实，压力范围为165~275MPa(24~40ksi)。

例如离合器片，其摩擦衬面在钟罩型烧结炉里被粘结在支承的钢衬板上。将未经烧结的离合器片放在一个镀铜的钢板上并堆积起来。将压力垂直地作用于它们的码垛上。烧结温度范围为550~950℃(1020~1740℉)，并维持保护气氛。一般的烧结时间为30~60min。为了尺寸精度和表面平行度，烧结零件一般都要切削加工。

摩擦元件通常用硬钎焊、弧焊、铆接或机械紧固方法固定在支承的钢零件上。它们也可以用压力直接固结在组件上。

铜基P/M电接触材料

铜基材料由于其高电导率和热导率、低成本和容易制造而被应用于电接触件上。它们的主要缺点是耐氧化和耐腐蚀性差。因此，使用铜基接触的地方是允

许发生由氧化膜引起的电压降处，或是有可能通过像油浸、封闭在保护性气体或真空中使其接触得到保护的场合。

一般用于电接触的铜合金包括黄铜(C27000)、磷青铜(C17200 和 C51000)和铜-铍合金(17200 和 C17500)。它们都是用熔化铸造工艺制成，并且限于使用较小的电流的用途，所产生的电弧和熔焊都不严重。

铜与耐熔金属(Cu-W)或其碳化物(Cu-WC)构成的复合材料应用于铜的有限氧化可被允许的用途，或者其氧化具有前面所述方法之一进行保护的用途里。电接触的性质取决于所采用的制造方法，而特定的方法又与复合材料的构成成分有关。按照一般的经验规则，含有 40% 或更少的钨或碳化钨的材料都是用传统的压制、烧结(通常低于铜的熔点)和再压制的方法制造。而钨含量超过 40% 的材料一般采用将铜渗入疏松的钨粉或压制-烧结的钨压实块里的方法制造。与之相对应的用碳化钨制造的材料都采用将铜渗入疏松的钨粉的方法制造，因为碳化钨粉是无法压制成压实块的。有关铜基电接触材料的其他内容可参阅本手册的“特种材料”一章。

铜基P/M 电刷材料

电刷是电动机和发电机在定子和转子之间传递电流的元件。最常用的电刷就是用石墨和导电金属的复合材料制造的。石墨提供所要求的润滑而金属提供载流的能力，铜和银由于其高电导率而成为这种金属的首选。

作为典型的铜-石墨电刷材料，其铜含量可以在 ~20% 至 75% 间变化，余量为石墨。由于这两种成分的不可混合性，粉末冶金是生产这种材料的惟一方法。用于电刷的铜粉可以采用氧化物还原、电沉积、喷雾或压碎等方法制造。

电刷的制造就是将铜和石墨的粉末进行调混。然后将其在 100 ~ 200MPa(15 ~ 30ksi)的压力范围里进行模压成电刷或大型坯块，其烧结前的密度为 2 ~ 4g/cm³。再让模压成的零件在 500 ~ 800℃(950 ~ 1500℉)的保护气氛中进行烧结。如有必要还要进行切削加工达到最终的尺寸精度。

铜-石墨电刷大量应用于由电池供电的电动工具中，这些工具在其小而轻型的组装中要求有很高的功率输出。一般输入电压会影响要求的金属含量。高电压要求低金属含量，而低电压则要求高金属含量。低于 9V 的金属含量通常高于 80%，而高于 18V 的金属含量一般低于 50%。

铜-石墨电刷也大量应用于汽车用途，包括起动马达、风扇马达、门锁和刮水器马达。起动马达一般采用高铜含量牌号的，以使其能承受短时期内的极高强度电流密度。风扇马达使用较低铜含量牌号的，以便延长其数千小时的使用寿命。门锁和刮水器马达则使用介于上述两者之间的牌号。

渗透处理零件

铁基 P/M 零件可以用铜或铜合金进行渗透处理，将一块渗料放置在零件的上面，然后在超过渗料熔点的温度里进行烧结。由于孔隙的毛细管作用，熔化渗料被充分吸收而形成复合组织。所渗料的量受到初始铁零件的孔隙容积的限制，一般范围为 15%~25%。

渗透能增加零件的密度，以此提高其力学性能、耐腐蚀性、电热传导性、切削加工性以及可钎焊性。渗入 15%~25% 铜的铁基零件能达到的抗拉强度范围为 480 ~ 620MPa(70 ~ 90ksi)。

使用渗透处理的铁基结构零件大多具有大于 7.4g/cm³ 的密度。一般的用例包括齿轮、汽车变速箱零件、气门座镶圈和汽车门铰链等。

经氧化物弥散强化的铜 P/M 材料

铜在工业上得到广泛的应用，是因为其很高的导电性和导热性，但是它的强度低，尤其当加热到高温时更是如此。它可以利用均匀弥散在基体中的如氧化铝、二氧化钛、氧化铍、二氧化钍或氧化钇等稳定氧化物细微颗粒得到强化。因为这些氧化物不能在液态铜中混溶，故无法采用传统的铸锭冶金技术制造这种弥散强化的铜，所以只能使用粉末冶金技术进行生产。

制造

氧化物弥散强化(ODS)铜可以采用将铜与氧化物进行简单的机械混合、从盐溶液中共沉淀、机械合金化或者由选择性或内氧化等方法制造得到。这些方法的弥散质量和成本也很不相同，内氧化能达到最细微和最为均匀的弥散效果。氧化铝是 ODS 铜制造中常用的弥散强化用材料。

在内氧化中，一种雾化的铜-铝合金就是在高温下被内部氧化。其过程是将铝转变成氧化铝。氧化铝弥散体的大小和均匀性取决于若干的工艺参数。粉末固化成全密度和/或不同的轧制形式都是用不同的技术完成的。轧制形式如圆棒和棒材都是通过将粉末密封在一个合适的包套(一般为铜)的容器中，并将其热挤到所要求的大小而得到的。线材是圆棒盘条经冷拉而制成的。带材是用挤制的矩形棒材盘条进行轧制

而制成的，或者不管是否借助金属容器都能直接将粉末轧制而成。大型型材无法用热挤压制造，可使用密闭粉末的热等静压方法制造，也可以通过对密闭粉末或经部分压实致密的预成形件进行热锻制造这种型材。

经固化材料的性能取决于粉末颗粒发生变形的程度。于是，小变形工艺如热等静压压制以及变形程度更小一些的热锻所生产的材料的强度和塑性，都低于那些用挤压方法生产的。

成品零件可以利用固化的型材通过切削、硬钎焊和软钎焊制造得到。而熔焊不推荐使用，因为它会造成氧化铝在液态的铜基体中发生偏析，以至弥散强化作用的削弱。然而，液态金属从焊点中挤出的闪焊和形成小热效应区域的电子束焊都能成功地应用。固态焊接(在闭合模中的多种冷镦锻)也能在线材的拉制过程中成功地用于将较小的盘条卷料连接到大的卷料上去。

性能

氧化物弥散强化铜将高强度与高导电导热性实现一种独特有效的结合。更重要的是它比起其他铜合金能在高温期间或其后保持更多的这些性能。

通过改变氧化铝含量和/或冷加工的程度来改善使 ODS 铜的性能，以便在一个很大的范围里满足设计要求。图 3.2-16 所示是作为铝/铝合金含量的函数的抗拉强度、伸长率、硬度和电导率的范围。这些性质一般都是针对在热挤压条件下的圆棒坯料。冷加工能用于扩大抗拉强度、伸长率和硬度的范围，但对于电导率的影响极小。

市场上有三种牌号的 ODS 铜供货。按照铜业发展协会它们被定名为 C15715、C15725 和 C15760。三种牌号的名义成分为：

牌号	铜		氧化铝	
	质量分数(%)	体积分数(%)	质量分数(%)	体积分数(%)
C15715	99.7	99.3	0.3	0.7
C15725	99.5	98.8	0.5	1.2
C15760	98.9	97.3	1.1	2.7

三种 ODS 铜的游离或可还原氧的含量一般为约 0.02%~0.05%(质量分数)，并且是以溶解氧和氧化亚铜的形式而存在的。如此状态的合金易于在高温下发生氢脆。在所有这些牌号中，都能以低氧(LOX)的成分组成，这时通过加入高至 0.020% 的硼作为氧吸收剂，使可还原氧转变为不可还原的氧化物，从而使它们避免发生氢脆，并必须将其规定用于在制造或使用过程中可能遭受还原气氛的零件。

物理性质。因为 ODS 铜含有少量的氧化铝并作为离散颗粒存在于基本纯净的铜基体里，故其物理性质与纯铜非常类似。表 3.2-31 列出的是三种工业用 ODS 铜的物理性质，并将其与无氧(OF)铜进行比较。它们的熔点基本上与铜的相同，因为基体发生熔化后氧化铝也就从熔液中分离出来。密度、弹性模量和线膨胀系数也都与纯铜相似。

表 3.2-31 三种氧化物弥散强化(ODS)铜和无氧(OF)铜的物理性质

性质	材料			
	C15715	C15725	C15760	OF 铜
熔点/℃(℉)	1083(1981)	1083(1981)	1083(1981)	1083(1981)
密度/[g/cm³(lb/in³)]	8.90(0.321)	8.86(0.320)	8.81(0.318)	8.94(0.323)
电阻在 20℃(68℉)/[Ω·mm²/m(Ω·圆密耳/ft)]	0.0186(11.19)	0.0198(11.91)	0.0221(13.29)	0.017(10.20)
电导率在 20℃(68℉),%IACS	92	87	78	101
导热率在 20℃(68℉)/[W/(m·K)(Btu/ft·h·℉)]	365(211)	344(199)	322(186)	391(226)
线膨胀系数在 20~1000℃(68~1830℉)/[ppm/℃(ppm/℉)]	16.6(9.2)	16.6(9.2)	16.6(9.2)	17.7(9.8)
弹性模量/GPa(10^6psi)	130(19)	130(19)	130(19)	115(17)

电气和电子工业的设计工程师尤其对高电、热传导性感兴趣。在室温下，其范围是纯铜的78%~92%。为此，与这些材料的高强度相结合，对于给定的截面尺寸和结构强度，它们的载流能力和散热能力可以得到增强。或者，在不牺牲其结构强度和电流、热量承载能力的前提下，减小其截面尺寸从而使元件结构小型化。在高温下，ODS铜的电、热传导性的下降也十分同步于纯铜。

室温力学性能。表3.2-32所示是ODS C15715以可能的轧制形式在室温下的力学性能。它们适用于很大的尺寸范围，例如通过拉制和轧制的不同程度，冷加工都有其典型意义。氧化物弥散强化铜具有能与许多钢相比拟的强度和能与铜相媲美的传导性。

表3.2-32　C15715典型的室温下力学性能

型材	厚度或直径		回火或状态①	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	硬度HRB
	mm	in		MPa	ksi	MPa	ksi		
扁平产品	10	0.400	A-C	413	60	331	48	20	62
	1.3	0.050	CW88%	579	84	537	78	7	—
	0.6	0.025	CW94%	620	90	579	84	7	—
	0.15	0.006	CW98%	661	96	613	89	6	—
板材	≤130	5.0	A-C	365	53	255	37	26	62
	25	1.0	CW60%	476	69	427	62	10	—
	16	0.625	CW75%	483	70	455	66	10	—
圆棒	29	1.125	A-C	393	57	324	47	27	62
	19	0.75	CW55%	427	62	407	59	18	68
	7	0.275	CW94%	496	72	469	68	9	72
线材	1.3	0.050	CW99%	524	76	496	72	2	—
	1.3	0.050	HT650℃	400	58	351	51	10	—
	0.4	0.015	CW99.9%	606	88	579	84	1	—
圆形材料	≤760	30	A-C	365	53	255	37	26	—

①A-C，固结后；CW，冷加工/%面积缩减率；HT，热处理1h。

氧化物弥散强化铜具有优异的抗软化性，甚至在经接近铜熔点的温度处置之后，因为氧化铝颗粒在此温度下还很稳定并保持原有的大小和间距。这些颗粒阻止位错和晶界移动，从而阻止再结晶的发生，再结晶通常与软化相关。图3.2-17比较了C15715带、OF铜(C10200)和铜-锆合金(C15000)的软化特性。在实际所处的普通硬钎焊和玻璃-金属封结温度(600℃或1110 ℉以上)里，ODS铜尚能保留其相当的强度，而OF铜和铜-锆合金要丧失它们大部分强度。因此，ODS铜能应用于需经受高温的工序，例如硬钎焊、玻璃-金属封结、热等静压压制和弥散粘结等制造的零件。

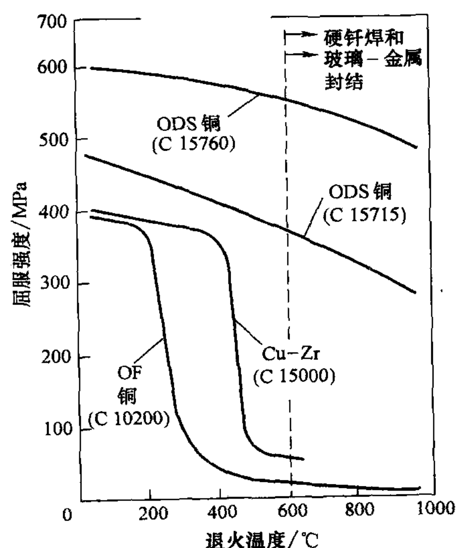


图3.2-17　氧化物弥散强化铜和无氧(OF)铜、铜-锆合金的软化特性的比较

高温力学性能。ODS铜还有优异的高温下强度。图3.2-18所示是C15760和C15715在高达870℃(1600 ℉)中100h的应力断裂强度。图中还示出了有其他高传导性的铜材料作为比较。在200~450℃

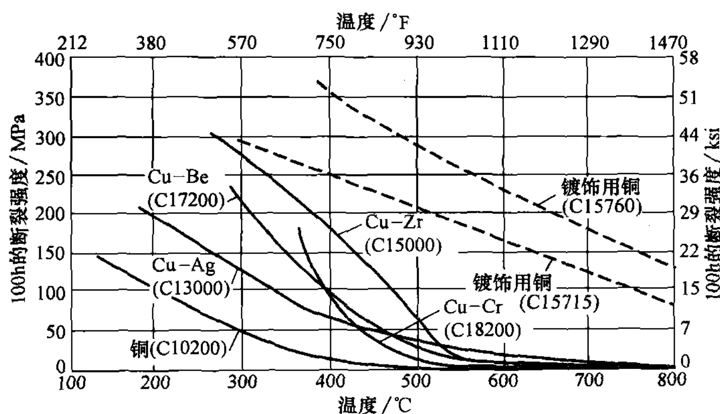


图3.2-18 与几种高传导铜合金相比，氧化物弥散强化铜的高温应力断裂性能

(400～850℉)的温度范围里，按照从纯铜处于低值的一端到析出硬化合金处于高值一端的序列，显示它们的应力断裂强度有大幅度的降落。超过400℃(750℉)，ODS铜优于所有其他合金。到了600℃(1100℉)以上，ODS铜的断裂强度甚至超过了某些不锈钢。氧化物弥散强化铜具有优异的高温热稳定性，因为氧化铝颗粒经长时间的加热后，仍能维持其原始的颗粒大小和间距，并不会使其基体发生再结晶。冷加工能显著提高ODS铜的应力断裂性能，且温度越高，这种提高也越明显。

应用

高电、热传导性、突出的耐腐蚀能力、易加工性以及高温下保持强度的综合性能使得ODS铜有许多方面的应用。对于有一定截面大小和结构强度要求的用途，弥散强化铜能增强其载流和热散失的能力，或者减小截面使零件小型化。主要的应用领域包括：

- 电阻焊电极；
- 金属惰性气体保护焊(MIG)接触头；
- 白炽灯的引入、引出导线；
- X射线和微波管元件；
- 继电器铜片和接触座；
- 滑动电接触器；
- 用于物理学和材料研究的粒子加速器中的元件；
- 混合电路的组装元件；
- 电火花加工(EDM)技术中所用的电极。

第6节 铜的受热软化及其应力松弛

铜和铜合金在一些需要承受适度高温的结构用途中用得非常广泛。其用例包括汽车散热器、太阳加热板、通信电缆和电接触插件。这些合金会在相对较低的运行温度下承受热软化(强度/硬度的下降)或应力松弛(一个受约束固体由于从弹性应变转变为塑性应变而造成其应力的减小)，从而导致使用失效。由于工业上用的铜合金在成分和工艺处理上的都有很大的可变范围，故其抗热软化和应力松弛能力也有相当的不同。当然，针对给定用途，遴选一种合金并不仅仅取决于应力-时间对温度的相应关系，还要取决于成本、基本的力学和物理性能、运行温度、使用环境以及成形性等因素。对许多的应用来说，电导率是一个主要考虑因素。

热软化数据

在低于工业热处理上引发再结晶的温度里，会长时期地持续发生热软化。在稍高的温度如果要求不发生软化，常规定使用C11100。这种铜含有少量的镉，用于提高其发生回复和再结晶的温度。无氧铜、电解韧铜和火炼韧铜都能作为一种特定的银含量为最少的含银铜所使用。银既可作为一种杂质存在于阳极铜里，或可作为熔化阴极铜有意加入的合金元素，也可使经冷变形加工的金属产生抗软化能力。含银铜和含镉铜都可应用于像汽车散热器以及必须在200℃(400℉)以上的温度里工作的导电体的一些用途。

在还原铜里，加入少量的如银、镉、铁、钴和锆的元素能使其在软钎焊工艺所处的各种情况和温度中产生抗软化性，例如汽车和卡车的散热器零件连接以及半导体零件组合的一些工序里。而其热、电传导性和室温力学性能都不为少量加入的这些元素所影响。然而镉-铜和锆-铜要采用比银-铜或电解韧铜更高的速率进行加工硬化。

冷轧含银铜广泛用于汽车散热器叶片。这类带材通常只能进行中载冷轧，因为重载冷轧将使含银铜更可能在软钎焊或烘烤工序中被软化。有些制造商宁愿选用镉铜C14300，因为它可以进行深度冷轧而不会在软钎焊中产生对软化的敏感性。图3.2-19示出了C14300和C11400的软化特征，其数据是按照多种温度和两种状态测量得到的。如图3.2-19b所示，将C14300冷轧至抗拉强度400MPa(64ksi)，再经过345℃(650℉)3min典型的心部烘烤之后，尚能保留91%的强度。而经同样冷压缩的含银铜C11400经过相同的烘烤规范之后，只能保留60%的抗拉强度。

另一个抗软化的最重要用途就是电子装置，如塑

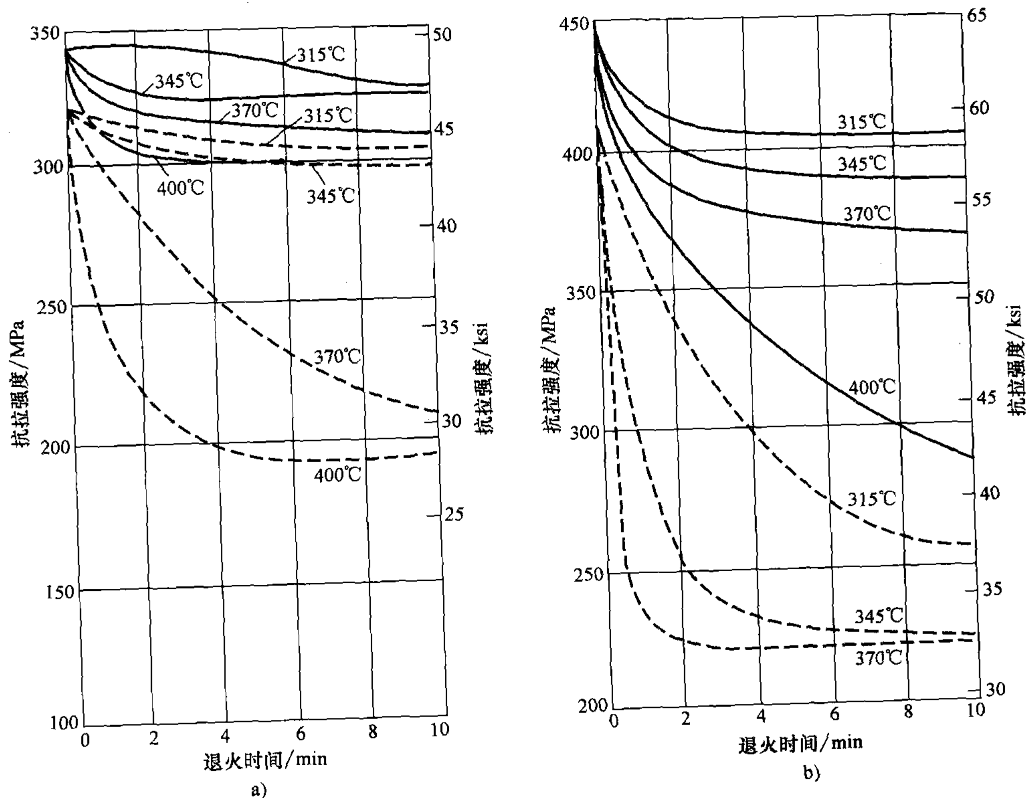


图 3.2-19　含镉铜（C14300，用实线表示）和含银韧铜（C11400，用虚线表示）的软化特性

a）冷压缩面积21%材料的软化曲线，厚度为0.1～0.075mm（0.0038～0.0030in）

b）冷压缩面积90%材料的软化曲线，厚度为0.75～0.075mm（0.0300～0.0030in）

料双列直插式插件的引线框架，在接插和组装的过程中，引线框架会经受高达350℃（660℉）的高温历时数分钟和高达500℃（930℉）的高温历时数秒钟。引线必须保持很好的强度，因为常用自动装配机将它们压入插座，所以软化了的引线会因变形而造成损坏。

合金 C15100（铜-锆）、合金 C15500（铜-银-镁-磷）、合金 C19400（铜-铁-磷-锌）和合金 C19500（铜-铁-钴-锡-磷）都常用于这些用途，因为它们有很好的导电性、强度及抗软化性。图 3.2-20 和图 3.2-21 比较了它们与电解铜 C11000 的抗软化性。

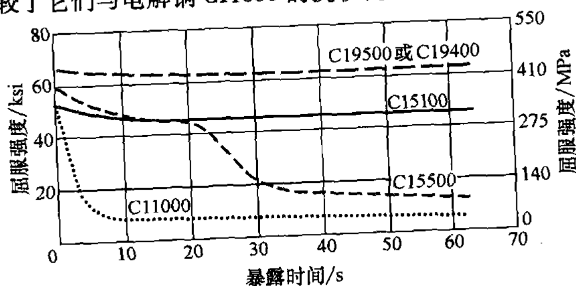


图 3.2-20　引线框架材料在上限温度（500℃或 930 ℉）的抗软化性

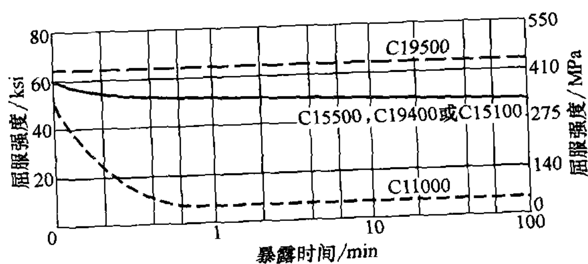


图 3.2-21　引线框架材料在中档温度（350℃或 660 ℉）的抗软化性

应力松弛数据

当以一外部应力作用于一块金属上时，它就会产生一个大小相等方向相反的内应力。如果该金属被固定在这个约束性位置上，其内应力就会作为时间的函数而逐渐减小。这种现象就称为应力松弛，其发生是因为材料中的弹性应变转变成塑性或永久应变。应变的减小速率将取决于合金、状态、温度和时间。

非合金 C11000（电解韧铜）也许是最不昂贵的高

电导率铜，它的广泛应用正是因为其容易制造。这种材料的应力松弛性是相当差的，如图 3.2-22 所示，将直径为 0.25mm 的 C11000 铜丝的松弛应力画成时间和温度的函数曲线，其初始拉应力为 89MPa (13ksi)。在给定时间，不同温度的应力值的比较表明，这种铜的应力松弛对温度有非常严重的依赖性。例如在 93℃(200℉)温度下经过 10^5h(11.4 年)就没有任何拉应力剩余下来，而在室温下 40 年后，还剩余 40% 的初始应力。对于 C11000 和许多其他铜金属，在给定时期内的应力松弛与热力学温度成反比(参考文献[1])。

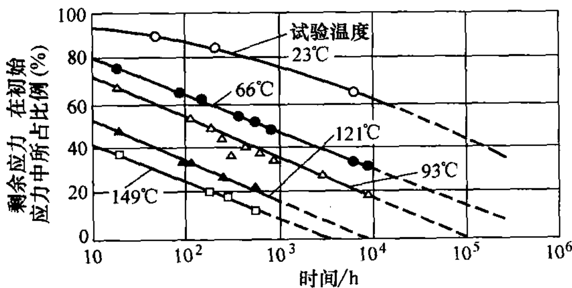


图 3.2-22　C11000 的拉伸应力松弛特征。数据为镀锡的 30AWG(直径 0.25mm)，**退火 ETP 铜丝，初始弹性应力为 89MPa**(13ksi)

C10200(无氧铜)的应力松弛性质比 C11000 好一些，如表 3.2-33 所示，其中还列出其他高传导率铜金属的应力松弛数据。有关 C10200 和 C11000 的力学性能更进一步的比较可以参阅参考文献[2]。

表 3.2-33　所列举的典型镀锡铜丝的 10000 小时的拉伸应力松弛

合金	状态	温度		初始应力①		剩余应力(%)
		℃	℉	MPa	ksi	
C10200	O61	27	80	82	11.9	69
C11000	O61	23	73	89	12.9	60
C15000	H04②	23	73	203	29.5	93
C16200	H04③	23	73	226	32.8	95

①初始应力设置为 0.2% 条件屈服强度的 55%。　②连续分股退火。　③分批退火。

在高传导性的铜中，非常高纯度铜(99.999+%)——一种主要用于研究的材料的松弛是最高的。通过加入能引起固溶强化、时效硬化或弥散硬化的合金元素，能使高传导性铜的应力松弛性质得到改善(参考文献[3])。例如，加入微量的银能显著减少铜的应力松弛(参考文献[4]、[5])。

与纯铜相比，较低传导性的合金经添加合金或析出硬化的强化后，其抗应力松弛的能力明显有所改善。图 3.2-23 给出了经析出硬化的铍-铜合金(C17200)的应力松弛数据。任何一种特定材料的性能都将依赖于化学成分、条件以及试验的温度。对于冷轧强化的材料，有以下几个一般性的评述。首先，在某一温度和在一定时期内所发生松弛的量将随此前冷变形加工的程度的增加而增加。第二，这些材料的性能与试件相对其轧制方向的取向有关。最后，重型冷轧材料的性能可以通过应力消除退火得到改善(参考文献[6]、[7])。图 3.2-24 示出了含有 5% Sn 的铜合金(C51000)的这些影响。

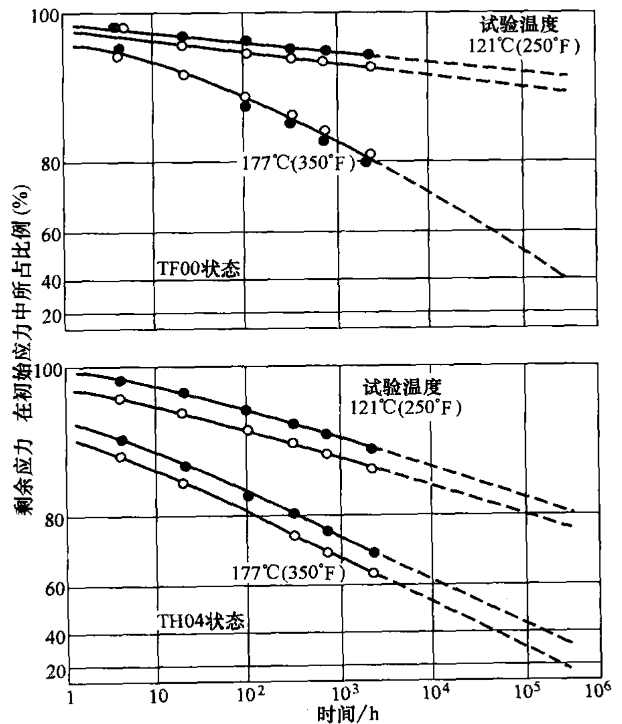


图 3.2-23　C17200 在两种初始应力下的应力松弛。数据出自铍铜带材(1.9% Be)，厚度 0.38mm(0.015in)。图中圆圈代表初始试验应力等于 80% 的单值弯曲屈服强度，圆点代表初始应力为 50% 的弯曲屈服强度。这种合金在高达 120℃(250℉)的温度下，只要初始应力低于弹性极限，就具有合适的抗应力松弛能力

表 3.2-34 列出常用于电工和电子弹簧的一些经固溶和弥散硬化的铜合金在 75℃(165℉)温度下的弯曲应力松弛数据。抗拉强度和电导率的数值也一并列出。一般来说，用剩余应力百分比测量的抗应力松弛将随溶质硬化剂的加入而增加，但是其电导率有所损失。应当指出对于一种确定的合金，通过

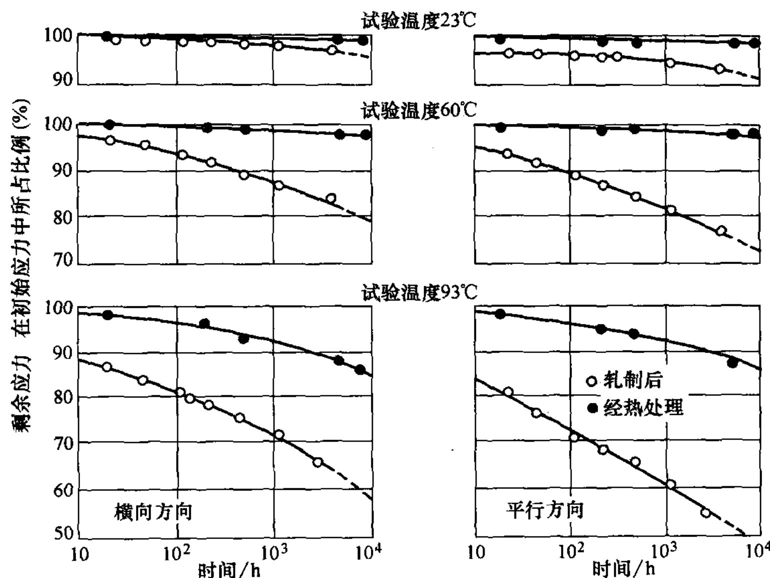


图3.2-24 经高冷加工的C51000带材，在弯曲中的各向异性性状。数据出自5% Sn的磷青铜冷轧93%(即面积减缩)至0.25mm(0.01in)并在260℃(500℉)的温度热处理2h。左面的图为应力松弛横向于轧制方向，右面的图为平行于轧制方向。初始应力：轧制后，平行方向，607MPa(88ksi)；轧制后，横向方向，634MPa(92ksi)；热处理，平行方向，641MPa(93ksi)；热处理，横行方向，738MPa(107ksi)

提高抗拉强度(状态)可以期待其抗应力松弛会有所降低。

表3.2-34 常用电工和电子弹簧材料在75℃(165℉)温度下的弯曲应力松弛数据

合金	电导率，%IACS	抗拉强度		剩余应力①(%)	
		MPa	ksi	1000h	10^5h
C15100	90	434	63	81	74
C19400	65	448	65	88	83
C19500	50	586	85	79	72
C26000	28	565	82	74	63
C42500	28	565	82	87	80
C51000	15	483	70	92	86
C65400	7	779	113	87	80
C68800	18	800	116	82	73
C72500	11	613	89	90	87
C75200	9	620	90	93	90

①$10^5$h的剩余应力百分比值是从1000h试验值外推算得到的。初始应力的大小为0.2%条件屈服强度的80%。

参考文献

[1] A. Fox, Stress-Relaxation Characteristics in Tension of High-Strength, High Conductivity Copper and High Copper Alloy Wires, *J. Test. Eval.*, Vol 2, (No. 1), Jan 1974, p 32–39.
[2] W.R. Opie, P.W. Taubenblat, and Y.T. Hsu, A Fundamental Comparison of the Mechanical Behavior of Oxygen-Free and Tough Pitch Coppers, *J. Inst. Met.*, Vol 98, 1970, p 245.
[3] A. Fox and J.J. Swisher, Superior Hook-Up Wires for Miniaturized Solderless Wrapped Connections, *J. Inst. Met.*, Vol 100, 1972, p 30.
[4] A. Fox, "The Creep and Stress Relaxation Behavior of Silver Bearing Copper Wire," Master's thesis, New Jersey Institute of Technology, 1972.
[5] W.L. Finlay, *Silver-Bearing Copper: A Compendium of the Origin, Characteristics, Uses and Future of Copper Containing 12 to 25 Ounces per Ton of Silver*, Corinthian Editions, 1968.
[6] A. Fox, The Effect of Extreme Cold Rolling on the Stress Relaxation Characteristics of CDA Copper Alloy 510 Strip, *J. Mater.*, Vol 6 (No. 2), June 1971, p 422–435.
[7] A. Fox, Stress Relaxation and Fatigue of Two Electromechanical Spring Materials Strengthened by Thermomechanical Processing, *IEEE Trans. Parts, Mater. Packag.*, Vol PMP-7 (No. 1), March 1971, p 34–47.

第7节 铜及其合金的腐蚀特征

铜和铜合金能在许多环境和用途中得到广泛应用，是因为其优异的耐腐蚀性，而且这种耐腐蚀性能

与其他所要求的性能，如优良的热电传导性、易于制造和焊接、能达到较大范围里的力学性能以及抗生物附着等相结合。铜在无污染空气、水和去气无氧化性的酸中受到的侵蚀是微不足道的。甚至还发现，经过地底下数千年的埋藏几乎仍接近原始状态的铜合金人工制品，还有在乡村大气中的屋面铜材料，历经200年的腐蚀率还不到0.4mm(15mil)。铜能耐许多的盐溶液、碱溶液和有机物质的腐蚀。然而，铜在氧化酸、氧化重金属盐、硫、氨(NH_3)以及一些硫和NH_3化合物中的快速侵蚀表现得较为敏感。对于酸溶液的耐蚀性主要取决于溶液中氧化条件的程度。铜与硫和硫化物的反应会生成硫化铜(CuS或Cu_2S)，通常妨碍铜和铜合金在一些为大家所知道的某些含硫的物质的环境中应用。

铜和铜合金能在许多方面得到非常好的应用，包括以下的一般性领域：

- 要求能在大气中暴露的场合，例如屋面和其他建筑用途、金属构件、建筑物的门面、格栅、手扶栏杆、锁体、门把手和脚踏板；
- 淡水的给水管线和管接头，它们对于不同种类的水和污物的高耐腐蚀性是很重要的；
- 船舰用途——最常用的是淡水和海水的给水管线、换热器、冷凝器、主轴、阀杆和船用构件，在这些用途中耐海水、水合物沉淀物以及由海水有机物形成的生物附着物的腐蚀是很重要的；
- 船舰、火电厂和化工流程上用的换热器和冷凝器，以及从液体到气体或从气体到气体的换热器，而不管在这些用途中工艺蒸汽是否含有腐蚀性污染物；
- 包括暴露在种种有机、无机化学物质中的工业和化学工厂的工艺设备；
- 电线、构件和接触器，印制线路板和电子用途，它们要求具有电、热和力学性能的综合，如半导体组件、引线框架和接插器件。

腐蚀的形成

像大多数其他金属和合金一样，铜和铜合金对若干形式的腐蚀是很敏感的，主要取决于环境条件。表3.2-35所列是铜金属通常所受到侵蚀所形成的各种腐蚀形式的特征识别，以及分别对应的最有效防范方法。

表3.2-35 铜腐蚀概述

侵蚀形式	特征	防范方法
普通腐蚀的减薄	金属均匀减少	根据失重数据针对环境条件选用适当的合金
电化学腐蚀	在靠近较为阴极的金属处容易发生腐蚀	避免电耦合的异类金属，保持阳极对阴极面积的优化比，保持氧化组分在腐蚀性介质中的优化浓度
点蚀	局部麻点、节瘤，水线点蚀，缝隙腐蚀以及外来物或脏物覆盖下的点蚀	合金选择，设计避免缝隙，保持金属清洁
浸蚀：冲蚀-腐蚀气穴	由湍流加上溶解气体所造成的冲蚀，一般成为沿流动方向的点蚀线	按流线型设计，保持低速、从液相中除去气体，采用耐浸蚀合金
微动磨损	摩擦或擦伤造成的磨损，常发生于运输过程中	润滑接触表面，用纸页将金属薄板隔开，减少支承表面的载荷
晶间腐蚀	沿晶体边界发生的腐蚀，而没有可辨认的裂纹	根据腐蚀样件的金相检查，针对环境条件选用适当的合金
脱合金	锌和镍被选择性地溶解掉，形成一层海绵铜	根据腐蚀样件的金相检查，针对环境条件选用适当的合金
腐蚀疲劳	多种穿晶型裂纹	根据在使用环境中的疲劳试验选用适当的合金，减小平均或交变应力
应力腐蚀开裂(SCC)	一般为晶间型开裂但有时为穿晶型的，常发生得相当快速	根据应力腐蚀试验选用适当的合金，减小作用应力和残余应力，去除环境中的汞化合物或NH_3

普通腐蚀

普通腐蚀是一种在整个表面分布均匀的侵蚀，极少或没有局部性的侵入。在所有的侵蚀形式中，其造成的损坏最轻。整体腐蚀也是惟一能根据失重数据，对侵蚀速率进行精确估算的腐蚀形式。

铜合金的普通腐蚀是由于与环境的长期接触所致，而且其腐蚀的速度非常低，例如淡水、微碱性水和咸水，许多种类的土壤，中性、碱性和酸性盐溶液，有机酸以及糖汁。其他能以较快的速度造成均匀减薄的物质包括氧化酸、含硫化合物、NH_3 和氰化物。

电化学腐蚀

浸没在导电溶液中的两种不同种类的金属之间总是存在着电化学电位。如果两种不同种类金属相互之间有电接触并浸没在导电溶液里，那么电位就会使较负电极化的电偶件(阳极)增加腐蚀，而使较正电极化的电偶件(阴极)得到保护。铜金属相对其他普通的结构金属如钢和铝几乎都是阴极的。当钢或铝被置于与铜接触时，钢和铝的腐蚀速度加快，而铜的腐蚀却因此减慢。普通牌号的不锈钢会出现不同的情况，即铜金属对于不锈钢可以是阳极的或阴极的，这取决于所暴露的条件。而与高镍合金、钛或石墨相耦合的铜金属，一般先行腐蚀。

当相对于饱和甘汞电极(SCE)测量铜金属的腐蚀电位时，其范围一般为 -0.2 ~ -0.4V，纯铜的电位约为 -0.3V。锌和铝的合金添加能使电位朝其范围的阳极端移动(更电负性)，锡和镍的合金添加能将电位朝其范围的阴极端移动(减少电负性)。在两种铜金属之间的电化学腐蚀很少成为需要考虑的问题，因为其电位差是如此之小。

表 3.2-36 所列是金属和合金适应于一些很稀的水溶液，如海水和弱酸的电势序。作为同组的金属能相互耦合而不会产生明显的电损伤。然而，不同组的金属相连接将会导致更阳极化的金属损伤，组别间的电势差越大，所产生的腐蚀也越严重。由于电效应引起的加速损伤通常在接近结合处达到最大，那里的电化学电流密度为最大。

表 3.2-36 海水中的电势序

阳极端
镁
镁合金
锌
镀锌钢
铝合金 5052H
铝合金 3004
铝合金 3003
铝合金 1100
铝合金 6053
包覆铝合金
镉
铝合金 2017
铝合金 2024
低碳钢
锻压铁
铸造铁
高镍耐热铸铁
AISI 型 410 不锈钢(活态)
50Pb-50Sn 软钎焊焊料
AISI 型 304 不锈钢(活态)
AISI 型 316 不锈钢(活态)
铅
锡
孟兹(锌铜)合金(Muntz)(C28000)
锰青铜(C67500)
海军黄铜(活态)
镍(活态)
铬镍铁合金(Inconel)(活态)
弹壳铜(C26000)
海军合金(C44300)
铝青铜(C61400)
红铜(C23000)
铜(C11000)
硅青铜(C65100)
铜镍，30%(71500)
镍(惰态)
铬镍铁合金(Inconel)(惰态)
镍铜合金(Monel)
AISI 型 304 不锈钢(惰态)
AISI 型 316 不锈钢(惰态)
银
金
铂
阴极端

影响电化学腐蚀的另一个因素就是面积比率。当阴极面积大而阳极面积小时，将处于一种不利的面积比。小阳极面积的腐蚀速度要比阴极和阳极面积相等时的腐蚀速度大好几百倍。相反地，当大阳极面积配以小阴面积时，电流密度和因电化学腐蚀引起的损坏都要小得多。例如用铜铆钉固定钢板可以在海水里延续一年半以上，但是用钢铆钉固定铜板在同样的时期内将遭到完全破坏。

主要有五种方法消除或明显减少电化学腐蚀：

- 选用在电势序中尽量相互挨近的不同金属；
- 避免小阳极与大阴极的配合；
- 只要可行，就将不同类金属完全隔离开来；
- 使用镀层并使其保持完好，特别是阴极件；
- 使用牺牲阳极，即将系统配合至对于双方结构金属来说都是阳极的第三者金属。

点蚀

如同大多数的工业用金属一样，铜金属的腐蚀会在一定的条件下导致点蚀。有时点蚀会布满全部表面并造成金属的不规则、粗糙的外观，在另外的情况里，点蚀集中在特定的区域并形成不同的大小和形状。

局部点蚀。这是腐蚀中最为严重的损坏形式，因为它在金属中形成凹陷和洞穴，从而降低其承载能力并增加应力集中。点蚀通常是在表面上没有完整保护膜、存在非保护性氧化皮沉积，或有其他外来物质或脏物局部淤积而造成的一种腐蚀形式。

在海水相对低的水流速度条件下，一般小于0.6~0.9m/s(2~3ft/s)较容易发生点蚀。点蚀的发生就其某一点穴在表面上的特定位置，甚至它是否将发生在一块特定的金属样件上而言都是有些随机性的。铜合金的长时间试验表明点蚀的平均深度并不会随暴露时间的延续而连续增加。相反，点蚀趋向于达到一定的限度，超此限度就看不出其深度会有所增加。在铜合金中，抗点蚀性最强的是含量低于8% Al的铝青铜和低锌黄铜。铜镍和锡青铜可以有中等的抗点蚀性，但是高铜合金和硅青铜更容易发生点蚀。

缝隙腐蚀。这是一种局部腐蚀形式，发生在由两种金属或一种金属与一种非金属的表面构形成的缝隙附近。如同点蚀，缝隙侵蚀也是随机发生的，其精确位置总是无法预料的。还有像点蚀一样，其侵蚀的深度看似达到一定程度为止而不是随时间不断增加。这个深度通常小于相应的点蚀深度，对于大多数的铜合金它小于400μm(12.8mil)。

对于大多数铜合金，由于形成金属离子的浓差电池，侵蚀的位置将处于缝隙的外面并与之毗邻。由缺氧和缝隙内侵蚀而引起的典型缝隙腐蚀对于铜合金来说并不多见。能形成钝化表面薄膜的、含铝和含铬铜合金都容易遭受氧差电池的侵蚀，就像铝合金和不锈钢一样。

类似于缝隙侵蚀的局部电池作用，也是由于外来物或碎屑如脏物、碎壳或草木的存在而形成的，或者可能由金属表面上的锈蚀、永久性氧化皮或腐蚀生成物的不均匀堆积所造成的。这种类型的侵蚀有时可通过表面清理予以控制。例如，冷凝器和换热器经过定期的清理就可以防止发生沉积侵蚀。

水线侵蚀。通风良好的液体表层与紧挨其下的缺氧层之间会形成氧差电池，水线侵蚀一词用于表示一种因这种氧差电池起作用而引起的点蚀。点蚀就直接发生在水线之下。

浸蚀

在气体、蒸汽或液体以高速冲击金属表面的地方，如冷凝器或换热器里会发生不同形式的浸蚀。快速运动的湍流水能将铜合金表面的保护膜剥离而去。这时，金属会以更快的速度发生腐蚀以重建这种保护膜，但是由于其一旦形成又很快被擦去，由此维持一种高而恒定的腐蚀速度。

冲蚀。它是以切割槽、波纹、压痕、沟槽和圆形孔洞为特征，它一般呈现为方向性的图案。凹坑被沿流动的方向延伸并沿其顺流的侧边切断。当腐蚀变得严重时，会形成一种马蹄形的沟槽或凹坑且使开口端指向顺流方向。随着侵蚀的延续，凹坑会连接起来形成相当大的一片切割凹坑。当冷凝管里发生这种类型的腐蚀，通常都是局限于靠近管子的入口处，此处正是液流湍急的地方。如果一束管子中的多根逐渐变堵，在尚能流通的管子里的流速就要加快，因此，其组件必须尽可能保持清洁。冲蚀最常见的是含低硫化合物的水以及遭污染、沾污、或砂质含盐的或微碱性的水。冲蚀作用会损坏局部保护膜，从而导致浓差电池的形成和局部的阳极部位点蚀。

气蚀。这是一种发生在流动水中的现象，这是流动因受到扰动而形成局部压力落差。在此条件下会生成一个蒸汽泡并随即破灭，于是产生一个高达1379MPa(200ksi)的瞬间应力作用于表面。这种对于表面的重复性作用会造成局部疲劳的状况并促使金属剥落。较硬的合金具有较大的耐气蚀能力，在发生气蚀之前往往存在着一个孕育期。在铜合金当中，铝青铜具有最佳的耐气蚀性。

通过减少流体的速度、提高流动的层流和排除吸

人的空气，可以减少浸蚀并延长组件的寿命。为此需要改进水箱、喷嘴和管线的设计，以此减少或消除低压气阱、层流障碍物、流动方向的突变以及其他造成局部区域高速或湍流的结构特征。冷凝器和换热器如果采用铝黄铜或铜镍中的一种材料制造就可以减少浸蚀敏感性，因其耐蚀性比黄铜或锡黄铜强。置于管道入口的防冲蚀插头和环氧树脂型的涂层是目前管壳式换热器常用的有效修复方法。当含有遭污染的水，则通过过滤或筛滤液体和清洁表面应该是非常有效的方法，将浸蚀降低到最低限度，采用阴极保护能减少除气蚀外的所有各种形式的局部侵蚀。

微动腐蚀

这是又一种侵蚀，称为微动腐蚀或微动磨损，呈现为金属表面上的凹坑或沟槽，该表面为腐蚀物所包围或充满。微动腐蚀有时候也认为是摩擦腐蚀、路途烧伤、摩擦氧化、磨损氧化或擦伤。

发生微动腐蚀的基本条件如下：

- 在两个表面之间必须有重复性的相对运动(滑动)，运动的相对幅度应是非常小——运动一般只有十分之几微米；
- 界面必须有载荷作用；
- 其载荷和运动必须足以让界面产生变形；
- 必须存在氧和/或潮湿。

在连续运动的润滑表面如轴承并不会发生微动腐蚀，而必须是重复相对小位移的干燥界面。在运输成捆、有平表面的轧制件的过程中会发生一种典型的微动腐蚀。微动腐蚀并不仅限于铜和铜合金，可以在几乎所有的表面——钢、铝、惰性金属、云母和玻璃上得到辨认。

微动腐蚀是可以控制的，有时甚至可以防止，方法有：

- 使用低粘度、高韧性的油，以此降低两种金属之间界面上的摩擦，并且从界面上将氧气排除；
- 分隔接合表面，将绝缘材料插在中间；
- 增加载荷以减少接合表面间的运动，这在实际中可能有困难，因为只要有微小的相对运动就能产生微动腐蚀；
- 降低支承表面上的载荷，以此增加零件间的相对运动。

晶间腐蚀

晶间腐蚀是一种常见的侵蚀形式，它在涉及高压蒸汽的用途里最常发生。这种类型的腐蚀沿着晶粒边界穿刺进入金属——常达几个晶粒的深度——以此可与表面粗糙度分辨。机械应力显然不是造成晶间腐蚀的一个因素。对于这种侵蚀表现最为敏感的合金要数孟兹(锌铜)合金、船舶铜、铝黄铜和硅青铜。

脱合金化

脱合金化就是较为活性的金属被有选择性地从合金中去除的一种腐蚀过程，遗留下来的则是较为惰性的金属，并成为一种薄弱的沉积。含有超过15% Zn 的铜锌合金对脱合金化是很敏感的，称之为脱锌。在黄铜的脱锌过程中，锌被有选择性去除后留下的是作为疏松薄弱层的铜和氧化铜。在主要腐蚀层下面类似性质的腐蚀继续下去，从而原本致密的黄铜逐渐为薄弱的疏松铜代替。除非得到遏制，脱合金化最终要穿透金属，使其结构减弱，以至在留下的结构里液体或气体会从疏松的基体里渗漏出去。

所谓堵塞型的脱合金化是指发生在局部区域的脱合金化，而其周围不受影响或只有轻度腐蚀(见图3.2-25)。对于均匀层状脱合金化，合金里的活性组分被浸滤出并遍布于大面积的表面上(见图3.2-26)。对于长时间与富含氧和 CO_2 的水相接触的、未受防护的黄铜而言，脱锌是一种常见的腐蚀形式。而且在静止和缓慢流动的溶液中更常常见到的。在略有酸度、低含盐量的水和室温里很可能会产生均匀的侵蚀，但是在中性或碱性、高含盐量的水和高于水温的情况下往往会产生堵塞型的侵蚀。

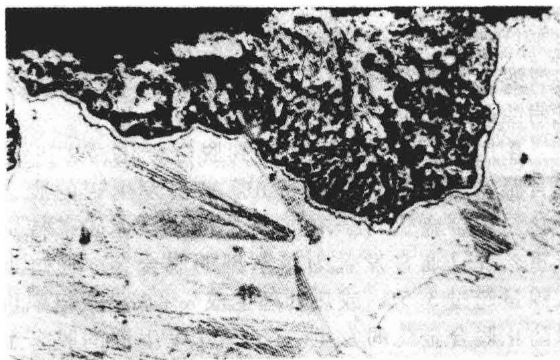


图3.2-25　在1N NaCl和室温中暴露79天的02663 α-黄铜(70Cu-30Zn)上发生的堵塞状的脱锌。注意堵塞形的疏松组织。围绕着堵塞的黑线是由试样腐蚀而形成的。160×

含铜量为85%或以上的黄铜能抗脱锌的发生。有二相组织的黄铜的脱锌一般更为严重，尤其如果第二相是连续的，同常分成两个阶段发生：高锌的β

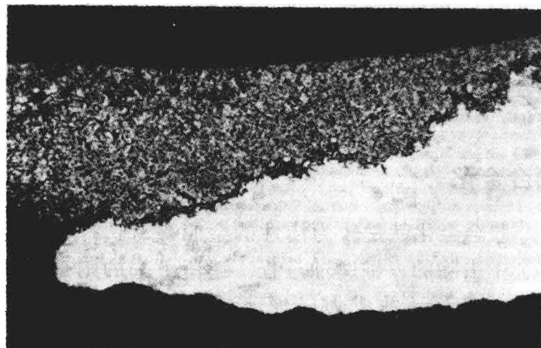


图3.2-26 在用于换热器管的海军黄铜上发生的均匀层状脱锌。照片所示上层由疏松、粉碎的铜颗粒组成，取自暴露于 pH8.0、31～49℃（87～120℉）和 207kPa（30psi）水里的管子内表面。脱锌层的下面为金黄色、完好的海军黄铜管子外壁。35×

相，接着较低锌的 α 相。

锡能阻止脱合金化的发生，特别在铸造合金里。合金 C46400（海军黄铜）和 C67500（锰青铜）都是是含有～1% Sn 的黄铜，广泛应用于海军设备里并且具有相当好的抗脱锌能力。在船舶铜（一种全 α71Cu-28Zn-Sn 的黄铜）加入少量的磷、砷或梯能遏制脱锌的发生。在防止 α-β 黄铜的脱锌方面抑制剂并非全部有效。因为它们无法阻止 β 相的脱锌。

在那些存在着脱锌问题的地方都能成功地采用红铜、工业用青铜、耐蚀船舶铜以及耐蚀铝黄铜。在某些情况里，通过选用低锌合金来防止脱合金化，因造成经济上的损失而不可取。低锌合金管材所要求的管接头只能是砂型铸件，而用于高锌管的管接头可以模铸或锻造远为经济。对于不宜选择低锌的用途一般首选耐蚀黄铜。

在其他合金中也能观察到脱合金化。某些铜-铝合金，特别是含量超过 8% Al 会发生铝的脱合金化。脱合金化对于有连续 γ 相的合金后果特别严重，并且通常发生为堵塞型的脱合金。通过加入镍量超过 3.5% 或热处理生成 α+β 显微组织可以防止脱合金化的发生。C71500 发生镍的脱合金化是很少见的，但在温度超过 100℃（212 ℉）、低流速条件和高局部热通量的情况下还是能观察到。铸造锡青铜在热盐水或蒸汽中发生的锡脱合金化，只是偶尔发生才能观察到的。阴极保护一般能保护除双相合金、铜-锌合金以外的所有铜合金使它们不发生脱合金化。

腐蚀疲劳

腐蚀（通常为点蚀腐蚀）与循环应力的共同作用会造成腐蚀疲劳开裂。像普通的疲劳裂纹一样，腐蚀疲劳裂纹一般也是沿与效应区内最大应力成直角的方向扩张。然而，同时由脉动应力和腐蚀引起的裂纹扩张速度远远快于单独由脉动应力所引起的裂纹扩张。还有，腐蚀疲劳失效通常包含多条平行裂纹，但是在发生简单疲劳失效的零件很少会发现多于一条以上的裂纹。图 3.2-27 所示就是由腐蚀疲劳造成使用失效的裂纹特征。

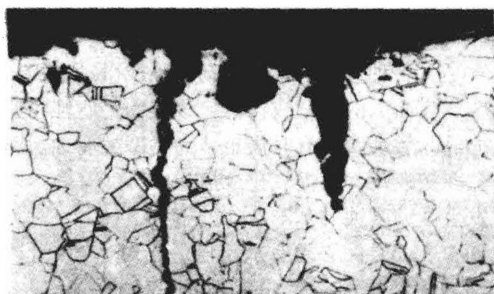


图3.2-27 典型的铜合金腐蚀疲劳开裂。穿晶裂纹起源于管子粗糙内表面上的腐蚀凹坑。试件腐蚀。大约 150×

按通常情况，腐蚀疲劳能很容易地根据所存在的起源于腐蚀凹坑的多根裂纹进行辨认。肉眼或低倍显微镜难以观察到的裂纹可以借助于深度腐蚀或塑性变形进行观察，或者用涡流检测仪进行探测。腐蚀疲劳裂纹常常都是穿晶型开裂，但是也有证据表明，某些环境会引发铜金属的晶间开裂。

铜及其合金不但能有效地耐腐蚀，还能在许多包含重复性应力和腐蚀的用途中耐腐蚀疲劳。这些用途包括像弹簧、开关、膜片、波纹管、飞机和汽车中使用的汽油和润滑油管路、冷凝器和换热器的管子以及造纸工业用的长网造纸机的一些零件。

同时具有高疲劳强度和高耐腐蚀性的铜合金也更可能会有良好的耐腐蚀疲劳性。在兼有循环应力和腐蚀性的用途里常用的合金，包括铍铜、磷青铜、铝青铜和铜镍。

应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂（SCC）与季节开裂（season cracking）都是指同一种现象——受载金属明显的自动开裂。应力腐蚀开裂通常是一种晶间的开裂（见图 3.2-28），但

是某些合金在一定的环境中也会发生穿晶开裂。只有当一种对此敏感性的合金承受应力和某种化学物质的共同作用才会发生应力腐蚀开裂。

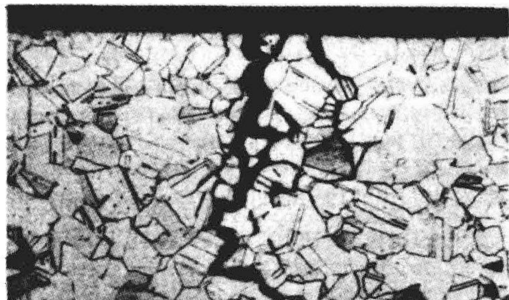


图3.2-28 典型的铜合金应力腐蚀开裂。在腐蚀的试样上的晶间开裂。大约60×

条件引发SCC。氨和铵基化合物是最常见的与铜合金SCC有关的腐蚀性物质。这些化合物有时存在于大气里，另外它们也存在于清洁用的化合物或用于处理锅炉水的化学物质里。作为腐蚀铜合金的NH_3是离不开氧和潮汽的存在，其他化合物如CO_2也被认为能加速在NH_3气氛中的SCC。金属表面的潮汽膜将能溶解相当量的NH_3，甚至能溶解低NH_3浓度的大气中所含的NH_3。

特定的腐蚀环境和持续的应力作用是造成SCC的主要原因，显微组织和合金成分会影响敏感性合金中的裂纹扩张速度。通过选择合金、成形工艺、热处理以及与金属精加工工艺的正确组合，就能最有效地控制显微组织和成分。虽然试验结果会表明其成品零件并不对SCC产生敏感，但是这样的结果并不能保证完全不发生开裂，特别在高应力的使用场合。

作用应力和残余应力两者都会导致SCC失效。其敏感度在很大程度上是应力幅度的函数。通常要求接近屈服强度的应力，但是零件在低得多的应力作用下也会发生破坏。一般来说，应力越高，造成SCC所必需的介质腐蚀性也越弱。反之亦然，腐蚀性介质越强，则发生SCC所要求的应力也越低。

应力源。作用应力来自普通的使用载荷和制造工艺，如铆接、螺栓紧固、过盈配合、硬钎焊和弧焊。残余应力分为两类：差分应变应力，由在冷成形过程中的非均匀的塑性应变所造成的；差分热收缩应力，由非均匀的加热和/或冷却所造成的。

由非均匀应变引起的残余应力主要受制造方法的影响。在一些制造过程中，有可能对金属进行深度的冷加工，故只产生很低的残余应力。例如在拉制管中产生的残余应力受模具角和压缩量的影响。广角模具(约32°)比窄角模具(约8°)产生更高的残余应力。轻度压缩量产生高残余应力因为这时仅有合金的表面受应力作用，重度压缩产生低残余应力因为冷变形加工区域会延伸到金属更为深层的地方。大部分的拉伸工序都可以通过规范使得残余应力降低并使其对SCC的敏感度可忽略不计。

很难对由镦粗、延伸和旋压成形引起的残余应力进行评估，也很难通过改变工装和工艺条件对其进行控制。对于这些工序可以通过耐腐蚀合金的选择和制造后对金属的处理更有效地防止SCC的发生。

合金成分。含量低于15% Zn的黄铜具有很高的耐SCC性。磷-脱氧铜和韧铜即便在严酷的条件下也很少发现SCC。另一方面，含量为20%~40% Zn的黄铜具有高度的敏感性。当锌的含量从20%增加至40%时，其敏感性也只有些许增加。

没有迹象表明，在黄铜中加入其他元素会增加发生SCC的可能性。一般认为在某些条件下，磷、砷、镁、碲、锡、铍和锰都能降低其敏感性。已经知道加入1.5% Si可减少开裂的可能性。

改变显微组织不能使敏感性合金变成完全耐SCC性。然而，敏感性合金的开裂速度看上去要受晶粒大小和组织的影响。所有其他的因素都不变，开裂的速度将随晶粒的增大而增大。组织对SCC的影响没有明显的规律，主要因为它们按照成分和应力的影响而相互关联。

控制方法。应力腐蚀开裂是可以控制的，并且有时通过下列方法防止其发生：选用具有高抗裂(尤其是含量低于15% Zn)的铜合金，通过消除热应力使残余应力减小到一个安全的水平而且还不让强度有明显的下降，或者改变环境如改变所存在的主要化学物质或引入腐蚀抑制剂。

利用成形和装配后的再结晶退火能消除残余应力和装配应力。当组织的完整性依赖于应变硬化金属的较高强度时，就不能使用再结晶退火，因为这种金属总要有一定量的残余应力存在。当必须保持住冷变形加工状态的较高强度时，可以对热应力消除(有时也称为应力消除退火)的工艺进行规范。热应力消除就是在相对短的时间里将零件加热到不太高的温度。所规定的时间和温度取决于合金成分、变形的严重程度、主应力以及加热时装载量大小。通常时间从30min~1h，温度从150~425℃(300至795 ℉)。表3.2-37列出一些较为普通的铜合金一般应力消除所采用的时间和温度。

表 3.2-37 一些普通铜合金一般所采用的应力消除参数

普通名称	UNS 编号	温度		时间/h
		℃	℉	
工业用青铜	C22000	205	400	1
弹壳黄铜	C26000	260	500	1
孟兹金属	C28000	190	375	½
船舶铜	C44300，C44400，C44500	300	575	1
磷青铜，5%或10%	C51000，C52400	190	375	1
硅青铜	C65500	370	700	1
铝青铜	C61300，C61400	400	750	1
铜镍，30%	C71500	425	800	1

应当通过检查特定零件的残余应力来制定正确的热处理规范。如果这种检查结果表明热处理不够有效，则应调整温度和/或时间直至得到满意的结果。一旦零件在炉里装载到周边时，其装在中部的零件可能达不到要求的温度。所以，或许有必要通过工艺规范的设定对炉子的装载方式进行补偿，或对一起进行应力消除的零件数量进行限制。

还可以采用如延伸、挠曲、弯曲、辊轴间的校直、锤击和喷丸等机械的方法将残余应力减小到一个安全的水平。这些方法是通过塑性变形减小有害的拉应力或将其转变为害处较小的压应力。

合金成分的影响

铜和高铜合金。它们有相似的耐腐蚀性。它们在海水和生物附着物中有优异的耐腐蚀性，但是对高速水流中的冲蚀较为敏感。高铜合金主要用于要求常能在稍高的温度里强化其力学性能、并具有良好的热、电传导性的用途里。提高高铜合金强度的工艺处理一般也能改善其耐冲蚀性。其中的很多合金已经开发用于电子用途——如接线夹、弹簧和引线框架——它们要求有一定的力学性能、相对高的导电性和耐大气腐蚀性。

黄铜。它们基本上是一种铜-锌合金，而且是铜合金中应用最为广泛的一个组别。只要锌含量不超过15%，黄铜耐水溶液的腐蚀性不会有明显的变化，超过15%Zn 就会发生脱锌。静止或缓慢流动的含盐溶液、弱碱水和弱酸溶液都是常常使得未经改良的黄铜发生脱锌的介质。

对 SCC 的敏感性明显地受含锌量的影响，含锌量高的合金也较为敏感一些。当含锌量从 15 降低到 0%时，耐敏感性有很大提高。工业用铜的应力腐蚀开裂情况还不太清楚。

铅、碲、铍、铬、磷和锰元素对铜和铍铜-锌合金的耐腐蚀性影响很小，甚至无影响。这些元素的加入用于提高力学性能如切削性、强度和硬度。

锡黄铜。锡的加入能明显提高某些黄铜的耐腐蚀性，尤其是其抗脱锌性。取得这种效果的例子有两种含锡黄铜，耐蚀船舶铜（无活性的 UNS 编号）和海军黄铜（C46400）。不耐蚀船舶铜就是曾经广泛用于制造换热器的管子，现在它大量地为耐腐蚀牌号的船舶铜（C44300、C44400 和 C44500）所代替，它们甚至具有更大的抗脱合金性。船舶铜是弹壳黄铜（C26000）的变型，通过在基本成分 70Cu-30Zn 中加入 ~1% Sn 而得到的。同样，海军黄铜是通过在孟兹金属（C28000）的基本成分 60Cu-40Zn 中加入 0.75% Sn 而得到的。

铝黄铜。这是一种除铜和锌以外还含有百分之几铝的黄铜，在其表面所生成的腐蚀膜中有一种重要组分，即氧化铝（Al_2O_3），它能显著提高在高速湍流盐水中的耐浸蚀性。例如，含砷铝青铜 C68700（76Cu-22Zn-2Al）常用于船用冷凝器和换热器，这种用途中，浸蚀会给它带来严重的问题。铝黄铜对脱锌很敏感，除非使其具有耐蚀性，如通常加入 0.02%~0.10% As。

耐蚀合金。在船舶铜、海军黄铜或铝黄铜加入磷、砷或锑（典型的为 0.02 至 0.10%）能有效形成高度的抗脱锌性。耐蚀合金广泛地应用于制造如冷凝管的一些零件上，这些零件需要延续在维修或零件更换而停机之间的多年连续使用。

磷青铜。在铜中加入锡和磷，能产生良好的对于流动海水和除盐酸（HCl）外的大部分无氧化酸的耐腐蚀性。含有 8%~10% Sn 的合金具有很高的耐浸蚀性。磷青铜对 SCC 的敏感性远低于黄铜，并与铜的耐硫侵蚀性相似。

锡青铜。它主要是以铸件的形式应用，并通过进一步加入铅、锌和镍合金元素而得到改善。这类合金具有相当的耐浸蚀性和良好的耐生物附着性。

铜镍。在所有工业用的重要铜合金中，合金 C71500（Cu-30Ni）是具有一般耐水溶液腐蚀性的最佳合金，但是合金 C70600（Cu-10Ni）常被选用是因为它能以低成本提供良好的耐腐蚀性。虽然这两种合金都能很好地适用于化学工业，但是最广泛的应用还是在于循环蒸汽系统中的冷凝器管和换热器管。它们在耐

酸溶液的腐蚀方面优于铜和其他铜合金，并且具有很高的耐 SCC 和耐浸蚀的能力。

锌白铜。有两种最重要的锌白铜，即 C75200（65Cu-18Ni-17Zn）和 C77000（55Cu-18Ni-27Zn）。它们在淡水和海水中都具有良好的耐腐蚀性。主要因为它们较高的含镍量能防止脱锌，C75200 和 C77000 在盐水中的耐腐蚀性通常大大超过有相似铜含量的黄铜。

铜-硅合金。一般具有与铜相似的耐腐蚀性，但是它们具有较高的力学性能和更好的焊接性能。这些合金看来都有比普通黄铜更好的耐 SCC 性。硅青铜会对高压蒸汽引起的脆化产生敏感，并且在决定将它应用于高温零件之前，应该先对其使用环境的适用性进行试验。

铝青铜。含有 5%～12% Al 的铝青铜具有优异的耐浸蚀性和耐高温氧化性。铝青铜可用于木纸浆机的搅拌棒和桨叶，因为它们具有承受机械磨粒磨损以及在亚硫酸盐溶液中耐化学侵蚀的能力。

在大部分的实际工业应用中，铝青铜的腐蚀特征主要与其铝的含量有关。在正常情况下，直至 8% Al 含量的合金有完全的面心立方（fcc）α 组织和良好的耐腐蚀性。当铝含量超过 8% 会出现 α-β 的双相组织。β 相是一种从 565℃（1050℉）或更高的温度快速冷却下来，并能在室温中保留下来的高温相。通过长时间地保留在 320～565℃（610～1050℉）的温度中并缓慢冷却，可以将 β 相分解成为具有片状或球状的 $\alpha+\gamma_2$ 的共析体。β 相的耐腐蚀性不如 α 相，而共析体组织甚至对侵蚀更加敏感。

根据特定的环境条件，铝青铜中的 β 相或共析体组织会被一种类似于黄铜脱锌的机制进行有选择性的侵蚀。双相组织合金，如 C62400 和 C95400 经适当的淬火和回火能形成一种带有再度析出针状 α 晶体的回火 β 组织，这种组合在耐腐蚀方面常优于正常的回火组织。

富铁颗粒作为一种小圆形或花形颗粒分布在约含 0.5% Fe 以上的铝青铜的整个组织里。这种颗粒有时会给表面带来一些锈蚀的色彩，但是对于腐蚀速度的影响还说不清楚。

镍-铝青铜是一种掺入 κ 相的较为复杂的组织。镍展现与 β 相的不同腐蚀特征，以此提高其在大部分液体中的抗脱合金化和耐气蚀性。C63200、也许还有 C95800 经过淬火和回火能产生甚至更大的抗脱合金化。合金 C95700 是一种高锰铸造铝青铜，其耐腐蚀性比 C95500 和 C95800 低一些，后两者的含锰量低，而含铝量稍高。

铝青铜一般适合在无氧化的无机酸如磷酸（H_3PO_4）、硫酸（H_2SO_4）和盐酸（HCl），有机酸如乳酸、乙酸（CH_3COOH）和草酸，中性盐溶液如氯化钠（NaCl）和氯化钾（KCl），碱如氢氧化钠（NaOH）、氢氧化钾（KOH）和无水氢氧化铵（NH_4OH），以及不同性质的水包括海水、微碱水和饮用水里使用。需避免的环境包括硝酸（HNO_3），某些金属盐如氯化铁（$FeCl_3$）和铬酸（H_2CrO_4），潮湿氯化烃类和潮湿 HN_3。在许多看来可混溶的介质中，透气性会导致腐蚀的加速。

在高拉应力的作用下，暴露在潮湿的 NH_3 中会造成 SCC。在一定的环境中，腐蚀会将其疲劳强度降低到相当于在正常大气中的疲劳强度值的 25%～50%。

对特定环境的选择

适当的耐腐蚀材料的选择要求包括对应力、速度、电耦合、浓度电池、初始表面条件和周围介质的污染等许多腐蚀的影响因素的考虑。多年的实践经验就是为特定环境选择最适用合金的最佳依据。铜业发展协会（CDA）编撰了以表 3.2-38 所示的评估形式的现场经验。该表只应当作为一种指南使用，有时候环境条件中的一些小变化，会使得所定的合金从“合适”恶化成为“不合适”。

表 3.2-38　锻造铜合金在不同腐蚀介质中的腐蚀评估

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
乙酸盐溶剂 Acetate solvents	优	优	好	优	优	优	优	优	优
乙酸 Acetic acid①	优	优	差	差	优	优	优	优	好
丙酮 Acetone	优	优	优	优	优	优	优	优	优
乙炔气 Acetylene②	差	差	②	差	差	差	差	差	差
乙醇 Alcohols①	优	优	优	优	优	优	优	优	优
乙醛 Aldehydes	优	优	中	中	优	优	优	优	优
烃胺 Alkylamines	好	好	好	好	好	好	好	好	好

（续）

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
氧化铝 Alumina	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氯化铝 Aluminum chloride	好	好	差	差	好	好	好	好	好
氢氧化铝 Aluminum hydroxide	优	优	优	优	优	优	优	优	优
硫酸氯和矾 Aluminum sulfate & alum	好	好	差	好	好	好	好	优	好
氨，干 Ammonia，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氨，湿 Ammonia，moist③	差	差	差	差	差	差	差	中	差
氯化铵 Ammonium chloride③	差	差	差	差	差	差	差	中	差
氢氧化铵 Ammonium hydroxide③	差	差	差	差	差	差	差	中	差
硝酸铵 Ammonium nitrate③	差	差	差	差	差	差	差	中	差
硫酸铵 Ammonium sulfate③	中	中	差	差	中	中	中	好	中
苯胺和苯胺染料 Aniline & aniline dyes	中	中	中	中	中	中	中	中	中
沥青 Asphalt	优	优	优	优	优	优	优	优	优
气氛 Atmosphere：									
工业的 Industrial③	优	优	优	优	优	优	优	优	优
海洋的 Marine	优	优	优	优	优	优	优	优	优
乡村的 Rural	优	优	优	优	优	优	优	优	优
碳酸钡 Barium carbonate	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氯化钡 Barium chloride	好	好	中	中	好	好	好	好	好
氢氧化钡 Barium hydroxide	优	优	好	优	优	优	优	优	优
硫酸钡 Barium sulfate	优	优	优	优	优	优	优	优	优
啤酒 Beer①	优	优	好	优	优	优	优	优	优
甜菜糖浆 Beet-sugar syrup①	优	优	好	优	优	优	优	优	优
苯，石油醚，粗苯 Benzene，benzine，benzol	优	优	优	优	优	优	优	优	优
苯甲酸 Benzoic acid	优	优	优	优	优	优	优	优	优
硫酸处理黑液 Black liquor，sulfate process	差	差	差	差	差	差	差	好	差
漂白粉（湿）Bleaching powder	好	好	差	好	好	好	好	好	好
硼砂 Borax	优	优	优	优	优	优	优	优	优
石灰硫酸铜液 Bordeaux mixture	优	优	好	优	优	优	优	优	优
硼酸 Boric acid	优	优	好	优	优	优	优	优	优
盐水 Brines	好	好	差	好	好	好	好	优	优
溴，干 Bromine，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
溴，湿 Bromine，moist	好	好	差	中	好	好	好	好	好
丁烷 Butane④	优	优	优	优	优	优	优	优	优
硫酸氢钙 Calcium bisulfate	好	好	差	好	好	好	好	好	好

（续）

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
氯化钙 Calcium chloride	好	好	中	好	好	好	好	好	好
氢氧化钙 Calcium hydroxide	优	优	好	优	优	优	优	优	优
次氯酸钙 Calcium hypochlorite	好	好	差	好	好	好	好	好	好
蔗糖浆 Cane-sugar syrup①	优	优	优	优	优	优	优	优	优
石炭酸(酚) Carbolic acid(phenol)	中	好	差	好	好	好	好	好	好
碳酸饮料 Carbonated beverages①⑤	优	优	优	优	优	优	优	优	优
二氧化碳，干 Carbon dioxide，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
二氧化碳，湿 Carbondioxide，moist①⑤	优	优	优	优	优	优	优	优	优
四氯化碳，干 Carbon tetrachloride，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
四氯化碳，湿 Carbonte trachloride，moist	好	好	中	好	优	优	优	优	优
蓖麻油 Castor oil	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氯气，干 Chlorine，dry⑥	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氯气，湿 Chlorine，moist	中	中	差	中	中	中	中	好	中
氯乙酸 Chloracetic acid	好	中	差	中	好	好	好	好	好
氯仿，干 Chloroform，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
铬酸 Chromic acid	差	差	差	差	差	差	差	差	差
柠檬酸 Citric acid①	优	优	中	优	优	优	优	优	优
氯化铜 Copper chloride	中	中	差	中	中	中	中	中	中
硝酸铜 Copper nitrate	中	中	差	中	中	中	中	中	中
硫酸铜 Copper sulfate	好	好	差	好	好	好	好	优	好
玉米油 Corn oil①	优	优	好	优	优	优	优	优	优
棉籽油 Cottonseed oil①	优	优	好	优	优	优	优	优	优
克鲁苏油 Creosote	优	优	好	优	优	优	优	优	优
导热油，联苯混合物 Dowtherm “A”	优	优	优	优	优	优	优	优	优
乙醇胺 ethanol amine	好	好	好	好	好	好	好	好	好
乙醚 ethers	优	优	优	优	优	优	优	优	优
乙酸乙酯 ethyl acetate(esters)	优	优	好	优	优	优	优	优	优
乙二醇 ethylene glycol	优	优	好	优	优	优	优	优	优
(三价)氯化铁 ferric chloride	差	差	差	差	差	差	差	差	差
硫酸铁 ferric sulfate	差	差	差	差	差	差	差	差	差
氯化亚铁 ferrous chloride	好	好	差	好	好	好	好	好	好
硫酸亚铁 ferrous sulfate	好	好	差	好	好	好	好	好	好
甲醛(乙醛) formaldehyde(aldehydes)	优	优	好	优	优	优	优	优	优
甲(蚁)酸 formic acid	好	好	差	中	好	好	好	好	好

（续）

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
氟氯烷（氟利昂），干 freon，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氟氯烷（氟利昂），湿 freon，moist	优	优	优	优	优	优	优	优	优
轻质燃料油 fuel oil，light	优	优	优	优	优	优	优	优	优
重质燃料油 fuel oil，heavy	优	优	好	优	优	优	优	优	优
糠醛 furfural	优	优	中	优	优	优	优	优	优
汽油 gasoline	优	优	优	优	优	优	优	优	优
明胶 gelatin①	优	优	优	优	优	优	优	优	优
葡萄糖 glucose①	优	优	优	优	优	优	优	优	优
骨胶 glue	优	优	好	优	优	优	优	优	优
甘油 glycerin	优	优	好	优	优	优	优	优	优
氢溴酸 Hydrobromic acid	中	中	差	中	中	中	中	中	中
烃类（碳氢化合物）Hydrocarbons	优	优	优	优	优	优	优	优	优
盐酸（氯化）Hydrochloric acid（muriatic）	中	中	差	中	中	中	中	中	中
氢氰酸，干 Hydrocyanic acid，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氢氰酸，湿 Hydrocyanic acid，moist	差	差	差	差	差	差	差	差	差
氢氟酸，无水 Hydrofluoric acid anhydrous	好	好	差	好	好	好	好	好	好
氢氟酸，含水 Hydrofluoric acid，hydrated	中	中	差	中	中	中	中	中	中
氟硅酸 Hydrofluosilicic acid	好	好	差	好	好	好	好	好	好
氢气 Hydrogen④	优	优	优	优	优	优	优	优	优
过氧化氢≤10% Hydrogen peroxide up to 10%	好	好	中	好	好	好	好	好	好
过氧化氢>10% Hydrogen peroxide over 10%	差	差	差	差	差	差	差	差	差
硫化氢，干 Hydrogen sulfide，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
硫化氢，湿 Hydrogen sulfide，moist	差	差	中	中	差	差	差	中	中
煤油 Kerosene	优	优	优	优	优	优	优	优	优
甲酮 Ketones	优	优	优	优	优	优	优	优	优
硝基漆 Lacquers	优	优	优	优	优	优	优	优	优
挥发性漆稀释剂 Lacquer thinners（solvents）	优	优	优	优	优	优	优	优	优
乳酸 Latic acid①	优	优	优	优	优	优	优	优	优
石灰 Lime	优	优	优	优	优	优	优	优	优
石硫合剂 Lime sulfur	差	差	中	中	差	差	差	中	中
亚麻籽油 Linseed oil	好	好	好	好	好	好	好	好	好
锂化合物 Lithium compounds	好	好	差	中	好	好	好	优	优
氯化镁 Magnesium chloride	好	好	中	中	好	好	好	好	好
氢氧化镁 Magnesium hydroxide	优	优	好	优	优	优	优	优	优

（续）

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
硫酸镁 Magnesium sulfate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
汞或汞盐 Mercury or mercury salts	差	差	差	差	差	差	差	差	差
牛奶 Milk①	优	优	好	优	优	优	优	优	优
糖蜜 Molasses	优	优	好	优	优	优	优	优	优
天然气 Natural gas④	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氯化镍 Nickel chloride	中	中	差	中	中	中	中	中	中
硫酸镍 Nickel sulfate	中	中	差	中	中	中	中	中	中
硝酸 Nitric acid	差	差	差	差	差	差	差	差	差
油酸 Oleic acid	好	好	中	好	好	好	好	好	好
草酸 Oxalic acid⑦	优	优	差	差	优	优	优	优	优
氧气 Oxygen⑧	优	优	优	优	优	优	优	优	优
棕榈酸 palmitic acid	好	好	中	好	好	好	好	好	好
石蜡 paraffin	优	优	优	优	优	优	优	优	优
磷酸 phosphoric acid	好	好	差	中	好	好	好	好	好
苦味酸 picric acid	差	差	差	差	差	差	差	差	差
碳酸钾 potassium carbonate	优	好	优	优	优	优	优	优	优
氯化钾 potassium chloride	好	好	差	中	好	好	好	优	优
氰化钾 potassium cyanide	差	差	差	差	差	差	差	差	差
重铬酸钾(酸) potassium dichromate(acid)	差	差	差	差	差	差	差	差	差
氢氧化钾 potassium hydroxide	好	好	中	好	好	好	好	优	优
硫酸钾 potassium sulfate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
丙烷 propane④	优	优	优	优	优	优	优	优	优
树脂 Rosin	优	优	优	优	优	优	优	优	优
海水 Seawater	好	好	中	优	好	优	好	优	优
污水 Sewage	优	优	中	优	优	优	优	优	优
银盐 Silver salts	差	差	差	差	差	差	差	差	差
肥皂溶液 Soap solution	优	优	优	优	优	优	优	优	优
碳酸氢钠 Sodium bicarbonate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
硫酸氢钠 Sodium bisulfate	好	好	中	好	好	好	好	优	优
碳酸钠 Sodium carbonate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
氯化钠 Sodium chloride	好	好	差	中	好	好	好	优	优
铬酸钠 Sodium chromate	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氰化钠 Sodium cyanide	差	差	差	差	差	差	差	差	差
重铬酸钠 Sodium dichromate(acid)	差	差	差	差	差	差	差	差	差

（续）

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
氢氧化钠 Sodium hydroxide	好	好	中	好	好	好	好	优	优
次氯酸钠 Sodium hypochlorite	好	好	差	好	好	好	好	好	好
硝酸钠 Sodium nitrate	好	好	差	中	好	好	好	优	优
过氧化钠 Sodium peroxide	中	中	差	中	中	中	中	好	好
磷酸钠 Sodium phosphate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
硅酸钠 Sodium silicate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
硫酸钠 Sodium sulfate	优	优	好	优	优	优	优	优	优
硫化钠 Sodium sulfide	差	差	中	中	差	差	差	中	中
硫代硫酸钠 Sodium thiosulfate	差	差	中	中	差	差	差	中	中
蒸汽 Steam	优	优	中	优	优	优	中	优	优
硬脂酸 Stearic acid	优	优	中	优	优	优	优	优	优
糖溶液 Sugar solutions	优	优	好	优	优	优	优	优	优
糖，固体 Sulfur，solid	好	好	优	好	好	好	好	优	好
硫，熔化 Sulfur，molten	差	差	差	差	差	差	差	差	差
氯化硫，干 Sulfur chloride，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
氯化硫，湿 Sulfur chloride，moist	差	差	差	差	差	差	差	差	差
二氧化硫，干 Sulfur dioxide，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
二氧化硫，湿 Sulfur dioxide，moist	好	好	差	好	好	好	好	中	中
三氧化硫，干 sulfur trioxide，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
硫酸 Sulfuric acid 80%~95%[9]	好	好	差	中	好	好	好	好	好
硫酸 Sulfuric acid 40%~80%[9]	中	中	中	差	中	中	中	中	中
硫酸 Sulfuric acid 40%[9]	好	好	差	中	好	好	好	好	好
亚硫酸 Sulfurous acid	好	好	差	好	好	好	好	中	中
鞣酸 Tannic acid	优	优	优	优	优	优	优	优	优
酒石酸 Tartaric acid[1]	优	优	好	优	优	优	优	优	优
甲苯 Toluene	优	优	优	优	优	优	优	优	优
三氯乙酸 Trichloracetic acid	好	好	差	中	好	好	好	好	好
三氯乙烯，干 Trichlorethylene，dry	优	优	优	优	优	优	优	优	优
三氯乙烯，湿 Trichlorethylene，moist	好	好	中	好	优	优	优	优	优
松节油 Turpentine	优	优	优	优	优	优	优	优	优
凡立水 Varnish	优	优	优	优	优	优	优	优	优
醋 Vinegar[1]	优	优	差	中	优	优	优	优	好
水，酸性矿井水 Water，acidic mine	中	中	差	中	好	中	中	差	中
水，饮用水 Water，potable	优	优	好	优	优	优	优	优	优
水，冷凝液 Water，condensate[3]	优	优	优	优	优	优	优	优	优
润湿剂 Wetting agents[10]	优	优	优	优	优	优	优	优	优

（续）

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特种黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍	锌白铜
威士忌 Whiskey[①]	优	优	优	优	优	优	优	优	优
白水 White water	好	好	好	优	优	优	优	优	优
氯化锌 Zinc chloride	好	好	差	好	好	好	好	好	好
硫酸锌 Zinc sulfate	优	优	差	优	优	优	优	优	优

注：本表所列的有关铜与铜合金在腐蚀性环境中的特性仅旨在作为一般指南使用。将在所有可能有的不同温度、浓度、速度、杂质含量、透气性和应力条件下的材料性能都归结在一张简单的表中是不可能的。评估也只是基于一般的性能，故使用时必须慎重，目的也仅是便于在候选合金中进行筛选。表中优、好、中和差所代表的意义如下：优：优异，满足几乎所有的使用条件；好：良好，会发生一些腐蚀，但是除了最严酷的以外，可满足所有使用条件；中：尚可，腐蚀的速率比“好”类的要高一些，但是在金属对其性能的需要超过对耐腐蚀性的需要，以及腐蚀的程度不会造成过分的维修费用，或腐蚀的影响可以通过使用涂层或抑制剂予以减小的情况下，使该金属还能使用；差：低劣，腐蚀率高，而且其使用一般也不能令人满意。

①铜和铜合金都能耐大多数食物制品的腐蚀。有微量的铜会溶解，并因此影响其制品的味道和颜色。为此铜合金常需要镀锡。 ②当存在潮湿或某些杂质并且气体在压力的作用下时，乙炔气由此形成一种含铜的易爆化合物。含量低于65% Cu的合金有令人满意的耐腐蚀性，当气体未受到压力作用时，其他合金也能令人满意。 ③应当注意避免应力腐蚀开裂。 ④在高温下氢气与韧铜发生反应，造成脆化失效。 ⑤在有空气存在的地方，腐蚀速率会提高。 ⑥在150℃(300℉)以下，腐蚀速率非常低的，超过这个温度，腐蚀明显并随温度的提高而快速增加。 ⑦提高透气度和温度会使腐蚀有相当大的加速。 ⑧超过120℃(250℉)会开始过度氧化。如果存在潮湿，氧化会在较低的温度下开始。 ⑨由于脱锌可能造成的快速腐蚀，故应避免在酸中使用高锌黄铜。铜、低锌黄铜、磷青铜、硅青铜、铝青铜和铜镍能提供良好的耐由冷稀 H_2SO_4 和冷浓 H_2SO_4 造成的腐蚀。有时候中等浓度 H_2SO_4 造成的腐蚀比无论浓酸还是稀酸造成的更严重。在高温下，由于酸的分解和金属硫化物、二氧化硫的形成，从而造成局部化点蚀，所以浓 H_2SO_4 会具有腐蚀性的。试验表明，铜合金可以在大约50℃(122℉)及90至95% H_2SO_4、在大约70℃(160℉)及80% H_2SO_4 和在大约100℃(212℉)及60% H_2SO_4 遭受点蚀。 ⑩润湿剂会从小到大，不同程度地增加铜和铜合金的腐蚀速度，由于当存在着二氧化碳或氧气时，它们会阻碍保护膜在金属表面的形成并(在某些情况下)会与溶解的铜化合生成绿的、不可溶的化合物。

凡是当缺少运行经验、试验报告上所设定的试验条件与选择合金所依据的条件不相紧密吻合，以及对资料上公布的数据的适用性有所怀疑时，最好另外进行独立试验。现场试验是最可信的。实验室试验可以有同样的价值，但是必须是其运行条件能够准确设定而且能在实验室里精确模拟。一般推崇长期试验是因为主导初始阶段腐蚀的作用与其后来所主导的作用之间可能会有相当大的差异。如果必须将短期的试验作为合金选择的依据使用，应该按照现场试验对该短期试验程序进行补充，这样才能根据实际运行经验重新评价实验室的试验结果。

不准确地检测腐蚀损坏尤其当腐蚀的程度较轻时，将会导致对实验室结果的错误结论。在普通实践中，以金属厚度上的侵蚀深度或平均减薄量表示试验结果，甚至实际上腐蚀是利用失重进行检测的。只有当腐蚀是均匀一致的，失重和平均侵蚀深度的数据才有效用。当腐蚀主要以点蚀或其他局部的形式发生，或者当腐蚀是晶间的或是一种厚氧化皮时，直接测量腐蚀才能得到最可靠的数据。一种常用的方法就是在所关注处的金相横截面上测量所能观察到的最大侵蚀深度。在一件或多件的试件上反复测量的统计平均值是可以被认可或不被认可。尽管实验室试验有这种不足，用以上方法得到的数据还是可以作为选择合金的一个有用的起始点。

大气暴露

在美国材料试验学会(ASTM)的指导下，历经20年的综合性试验以及许多应用记录都已确认铜和铜合金在大气暴露中的适用性(表3.2-39)。铜和铜合金能耐工业的、海洋的和乡村的大气腐蚀，除了含有 NH_3 或高锌合金(>20% Zn)在里面能观察到SCC的某些介质以外。在大气中应用最广的铜金属有C11000、C22000、C23000、C38500和C75200。合金C11000是用于屋面、围墙板、排水沟和落水管的有效材料。

在建筑用途中，不同铜合金的颜色常是很重要的，可能是选择特殊合金颜色的主要依据。表面经

过如喷砂和抛光的处理之后不同的铜合金，会有从银色到黄色、金色和浅红色的各种色泽。具有相同初始颜色的不同合金，经在相同条件下的风化后会展现出不同的颜色。因此在特定的结构上，通常都要把具有相同或相近成分的合金使用在一起，以此保持其外观的一致性。

表 3.2-39 选定铜合金的大气腐蚀

合金	所在美国有关地区的腐蚀①											
	Altoona，PA		New York，NY		Key West，FL		La Jolla，CA		State College，PA		Phoenix，AZ	
	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a	μm/a	mil/a
C11000	1.40	0.055	1.38	0.054	0.56	0.022	1.27	0.050	0.43	0.017	0.13	0.005
C12000	1.32	0.052	1.22	0.048	0.51	0.020	1.42	0.056	0.36	0.014	0.08	0.005
C23000	1.88	0.074	1.88	0.074	0.56	0.022	0.33	0.013	0.46	0.018	0.10	0.004
C26000	3.05	0.120	2.41	0.095	0.20	0.008	0.15	0.006	0.46	0.018	0.10	0.004
C52100	2.24	0.088	2.54	0.100	0.71	0.028	2.31	0.091	0.33	0.013	0.13	0.005
C61000	1.63	0.064	1.60	0.063	0.10	0.004	0.15	0.006	0.25	0.010	0.51	0.002
C65500	1.65	0.065	1.73	0.068	—	—	1.38	0.054	0.51	0.020	0.15	0.006
C44200	2.13	0.084	2.51	0.099	—	—	0.33	0.013	0.53	0.021	0.10	0.004
70Cu-29Ni-1Sn②	2.64	0.104	2.13	0.084	0.28	0.011	0.36	0.014	0.48	0.019	0.10	0.004

①根据长达20年的暴露试验。大气种类：Altoona，工业的；纽约市，工业的；Key West，热带乡村海洋的；La Jolla，潮湿海洋的；State College，北方乡村的；Phoenix，干燥乡村。 ②虽然已废弃，但这种合金还能表示C71500所预期的耐腐蚀性。

铜合金常被规定在海洋大气中暴露使用，这是因为它们在暴露过程中所形成的诱人并具保护性的铜绿。在海洋大气的暴露中，这种铜绿是由一层以氯化铜或碳酸铜为主的薄膜构成，有时还有 Cu_2O 作为其内层。在海洋大气中的腐蚀严重度要低于在工业大气中的，但高于在乡村大气中的。然而，这些腐蚀速率随时间而减小。

土壤和地下水

土壤。铜、锌、铅和铁都是在地下结构中最常用的金属。由美国前国家标准局(NBS)编制的数据比较了以下四种类型土壤材料的特性：透气度很好的酸性土壤，有很低的可溶性盐分(塞西尔粘土沃泥，Cecil clay loam)；透气度差的土壤(查尔斯湖粘土，Lake Charles clay)；碱性土壤，有高可溶性盐分(道克斯粘土，Docas clay)以及高硫化物土壤(来复泥炭土，Rifle peat)。

图3.2-29所示是作为时间函数的铜、铁、铅和锌暴露在这四种土壤中的腐蚀数据。其中铜展示了其在代表大多数在美国所能发现的这四种土壤中的高耐腐蚀性，也有局部地区的土壤条件会有不同寻常的腐蚀，对此有必要采取一些像阴极保护、中和回填土(如石灰石)进行保护性涂层或包扎的保护性措施。

多年来，NBS(即现在的国家标准和技术学会，NIST)通过对地下结构的研究来确定金属和合金长时间暴露在大范围的土壤里的腐蚀特性。其结果表明，韧铜、还原铜、硅青铜和低锌黄铜的特性都基本相似。含有高浓度的硫化物、氯化物或氢离子(H^+)的炉渣的土壤会腐蚀这些材料。在这种类型的杂质土壤中，超过大约22% Zn的铜-锌合金的腐蚀速率随含锌量的增加而增加。腐蚀一般是由脱锌而造成的。在仅含有硫化物的土壤中，铜-锌合金的腐蚀速率随含锌量的增加而减小，并且不会发生脱锌。虽然耐腐蚀的船舶铜并不包括在这种试验里，但是它们还是表现出明显的抗脱锌性。

地下水。在很深的地底下，能发现天然形成的含盐水。虽然这种水的成分和浓度随其发现地方的不同而不同，但是含有溶解物的浓度一般是随其所处深度的增加而增加。在矿井里、在石油钻井过程中以及很深的钻井里都会发现这种地下水。这种水的成分很复杂，常常是钠(Na^+)、钙(Ca^{2+})、镁(Mg^{2+})、氯(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2+})、碳酸氢根(HCO_3^-)和微量其他离子的混合体。在岩床里的铁矿石会与溶解于地下水中的氧发生反应，并形成一种比近表水较不容易氧化的条件。

铜和铜合金腐蚀速率在很大程度上都取决于所存在的氧含量。这一点可以用表3.2-40所列的纯铜和

Cu-10Ni在人工配制的不同地下水中的数据予以说明。这些数据是通过延续2～4星期的试验得到的，它们包括高的初始腐蚀率，但并不代表它们的长期腐蚀速率。然而，它们确实可用于表明溶液的还原导致其短期腐蚀速率至少会有一个数量级的幅度降低。从这些数据中还可清楚地看到，至少在透气的溶液里，镍的加入会降低铜的均匀腐蚀速率。这是由于形成了一层保护性更好的表面膜。

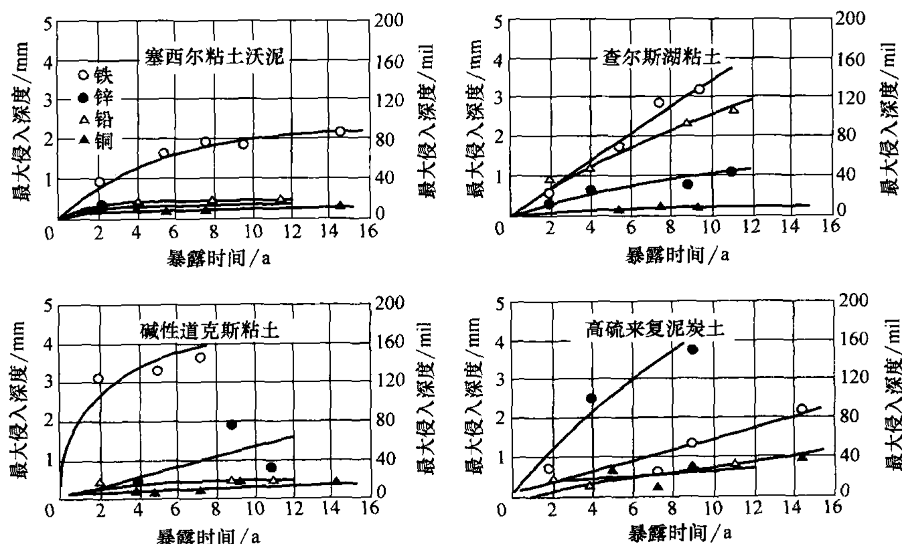


图3.2-29 铜、铁、铅和锌在四种不同土壤中的腐蚀

表3.2-40 铜在含盐分的地下水中的短期腐蚀速率

合金	地下水种类	氧气浓度 mg/g	温度 ℃	温度 ℉	腐蚀速率 mm/a	腐蚀速率 mil/a
C10100	人工配制	<0.1	150	300	15	0.6
	55g/L TDS①	6	150	300	340	13.4
铜	盐水 A	<0.1	250	480	70	2.8
	306g/L TDS①	600	250	480	1200	47.2
	海水	<0.1	250	480	50	2
	35g/L TDS①	1750	250	480	5000	197
Cu-10Ni (C70600)	盐水 A	<0.1	250	480	140	5.5
		600	250	480	400	15.7
	海水	<0.1	250	480	70	2.8
		1750	250	480	700	27.6

①TDS，总溶解固体量。

水

淡水。铜特别适用于在淡水中的处置。用于在K形液面量仪的中带有扩口管接头的铜管就是专供地下水的使用，还有L型管现也已成为该用途的标准型式。铜管线的最大独一无二的用途就是家居或其他建筑里的热、冷水管的布线，尽管也大量地用于热水管线（包括家用散热管线）、排水管线和消防系统。

蒸汽。铜和铜合金都能耐纯蒸汽的腐蚀，但如果存在着较多的CO_2、氧气或NH_3，则其冷凝物是有腐蚀性的。甚至高速湿蒸汽都会造成严重的浸蚀，铜合金广泛应用于冷凝器和换热器上。铜合金还应用于供水加热器上，尽管它们在这方面的应用，由于在中度高温下其强度和耐蠕变的性能都会急剧下降，因而要

受到一些限制。铜镍是一种适合在较高的温度和压力下使用的铜合金。

铜在处置热水和热蒸汽时的应用受制于管子和接头的工作压力。例如名义直径为6.4～25mm的铜管采用50Sn-50Pb的软钎料进行连接能承受的温度至120℃(250℉)和压力至585kPa(85psi)。当系统的连接采用95Sn-5Sb的软钎料时，同样大小的管材在上述温度下的工作压力可提高至1380kPa(200psi)。当连接材料为熔点超过540℃(1000℉)的含银硬钎焊合金时，在120℃(250℉)温度下的这种尺寸范围的管材的工作压力可提高到2070kPa(300psi)。有一些铜合金会因为受重载及暴露在蒸汽中，而发生SCC并可能导致失效。不含有锡的α铝青铜也属于这类敏感性的合金。

蒸汽冷凝物。蒸汽冷凝物经过适当处理后成为一种相对不含有非冷凝物的气体，如在发电厂，它对于铜和铜合金都是相对无腐蚀的。在这种暴露中的侵蚀速率小于25μm/a(0.1mil/a)。如由往复蒸汽发动机产生的含有相当多油的冷凝物，铜和铜合金都不受其侵蚀。

溶解在里面的CO_2、氧气或二者兼之会显著增加侵蚀的速率。例如含有4.6ppm O、14ppm CO_2的以及在温度为68℃(155℉)下pH为5.5的冷凝物，当与C12200(磷-还原铜)、C14200(砷铜)、C23000(红铜)、C44300至C44500C(船舶铜)和710000(铜镍，20%)接触时，会造成175～350μm/a(6.9～13.8mil/a)的侵蚀深度。在相同条件下，钢的试验结果会产生两倍于上述铜合金的侵蚀深度，但是现已证明镀锡铜合金具有更强的耐腐蚀性，其侵蚀的速率低于25μm/a(1mil/a)。为了在冷凝水系统里达到最佳使用寿命，有必要确保管子安装时有足够的倾斜使水排去，以便减少在机械或化学处理过程中造成腐蚀剂(通常CO_2和氧)的储留。

盐水。铜合金的一个重要用途就是用于船舰和潮汐发电站的海水处置。尽管作为铜本身是很有用的，但是它的耐一般性腐蚀不如C44300～C44500C、C61300、C68700、C70600或C71500。而这些合金的优良性能是由它们在海水里的不溶性、耐冲蚀性和耐生物附着性的结合而形成的。铜和铜合金在相对静止的海水里的腐蚀速率一般低于50μm/a(2mil/a)。

在实验室里和实际使用中，铜镍合金C70600、C71500、C72200和C71600都表现出它们在海水中的优异耐腐蚀性。C70600和C71500的平均腐蚀率从2～12μm/a(0.08～0.5mil/a)。这两种合金暴露在静止和低速流动海水中经过14年长期评价，腐蚀率低于2.5μm/a(0.1mil/a)。

被污染的冷却水。特别在沿海港口和河口的受污染冷却水中使用的含铜合金包括铜镍都会造成发电厂和船舶所用冷凝器的早期失效。虽然近年来，许多港口由于实施严格的排污标准而大大降低了污染，但是因污染水造成冷凝管和海水管线的加速侵蚀仍时有报告。

含铜合金在污染的海水中被加速侵蚀的主要原因有：①在厌氧条件下(如在海底的泥浆或沉积物)，硫酸盐还原细菌对海水中存在的天然硫酸盐的作用。②在持续停机期间，在海水系统中动植物腐烂物形成的有机硫化合物的腐败作用。通过适当的设计、抑制剂的使用或在海水中加入铁(加入硫酸铁或牺牲铁阳极)都能增强其耐腐蚀能力。

生物附着。长期以来为人们就认识到包括铜镍合金在内的铜合金特别具有一种耐海洋附着的能力。这种耐附着性通常与如藤壶、贻贝和具有相应大小的海洋无脊椎动物的一类宏观生物附着有关。船身采用C70600和D71500(原文如此,似应为C71500——译者注)制造的捕虾拖网船和私家游艇的使用经验表明，具有优异的耐硬壳附着的能力，故伴之以船身维护成本的降低。铜镍合金用于海水进入口的网筛，正是借助其机械强度、耐腐蚀性和耐生物附着的特点而能很好地发挥其功能。

换热器和冷凝器。在选择用于冷凝器和换热器的材料时，有必要调查其使用条件，考察过去曾用过的管子并评价其使用寿命，以及审查在其设备或类似的设备中发生腐蚀的种类、形式和部位。水的种类和运行条件有很大的变化范围，对管子可能要求的功能的任何评估都必须根据其特定的运行因素来进行。不同合金的管子，如耐腐蚀船舶铜(C44300、C44400、C44500)、耐腐蚀铝黄铜(C68700)、铝青铜(C61300和C63200)、铜镍(C70600和C71500)和磷-还原铜(C12000至C12300)，都能在此用途中的得到满意和经济的效果。

酸

铜在工业设备中广泛应用于处置各种酸溶液。在能用铜和不能用铜处置的酸之间存在着一个相当明确的界限。一般来说，只要氧化剂如溶解的氧(空气)、铁(Fe^{3+})或重铬酸离子的浓度一直很低，铜合金就能成功地与非氧化酸如乙酸(CH_3COOH)、硫酸(H_2SH_4)、盐酸(HCl)和磷酸(H_3PO_4)一起使用。广义地说，凡是充分扰动或搅拌的溶液或有空气中的蒸气在里面沸腾起泡的溶液都会使里面的空气接近饱

和，因此它不适合作为铜的酸介质。作为本身就是氧化剂的酸如 HNO_3、亚硫酸（H_2SO_3）、热浓硫酸（H_2SO_4）以及携带如 Fe^{3+} 盐、重铬酸离子或高锰酸盐（MnO_4^-）离子这样一些氧化剂的酸都不能在用铜或铜合金制造的设备里进行处理。

稀释（直到1%）的非氧化酸对铜的腐蚀作用相对较低，腐蚀速率通常小于 $6g/m^2/d$（等同于侵蚀深度速率：250μm/a 或 10mil/a）。作为氧化酸，只有当其浓度不超过 0.01% 时，才有这样的腐蚀速率。当酸的浓度达到如此之低时，无论是氧化酸还是非氧化酸，其透气性均不产生什么影响。

透气性接近零的非氧化酸事实上已经没有任何腐蚀作用了。在 1.2N 的 H_2SH_4、HCl 和 CH_3COOH 中，当缺少空气时，其腐蚀速率小于 $0.1g/m^2/d$（4μm/a 或 0.15mil/a）。

除 HCl 以外，当非氧化酸含有的空气多至被吸附到能与大气作静态的接触时，其腐蚀性也就很微弱。腐蚀的速率范围一般从 $0.5 \sim 6g/m^2/d$（大约从 20～250μm/a 或 0.8～10mil/a）。

空气饱和的非氧化酸溶液很可能有强腐蚀性，其腐蚀速率为 $5 \sim 30g/m^2/d$（大约从 0.2～1.25mm/a 或 8～50mil/a）。作为 HCl，其腐蚀速率更高。在任何一种透气的酸里，实际腐蚀取决于酸的浓度、温度和其他难以确认的因素。除在非常稀的溶液里以外，氧化酸对铜的腐蚀是很快的——通常达 $50g/m^2/d$（2.1mm/a 或 85mil/a）。其反应与透气性无关。

三种普通酸的腐蚀速率的比较如下表所示（温度和透气度不作规定）：

酸	腐蚀速率		
	$g/m^2/d$	mm/a	mil/a
32% HNO_3	5700	240	9450
浓 HCl	18	0.75	30
17% H_2SO_4	2	0.1	4

磷酸、CH_3COOH、酒石酸、甲（蚁）酸、草酸以及类似酸的作用与 H_2SH_4 不相上下。

碱

铜和铜合金都耐碱溶液的腐蚀，除了那些含有氢氧化铵（NH_4OH）或能水解成为 NH_4OH 或氰化物的化合物。氢氧化铵与铜反应生成可溶的复合铜阳离子。暴露在碱——而非前面所提到的（如氢氧化钠）——里的铜-锌合金，在室温不流动的条件下其侵蚀速率为约 50～500μm/a（2～20mil/a），但是在透气和沸腾的溶液里约为 500～1750μm/a（20～70mil/a）。

与金属氢氧化物的侵蚀率相比，强 NH_4OH 溶液能快速侵蚀铜和铜合金，因为有可溶的复合铜-铵化合物的生成。然而在某些用途里，暴露在稀 NH_4OH 溶液里铜的腐蚀是很低的。例如把铜试件在室温下浸没于 0.1*N* 的 NH_4OH 溶液里一个星期，将会产生 $1.5g/m^2/d$（60μm/a 或 2.5mil/a）的失重速率。

氢氧化铵溶液还会侵蚀铜-锌合金。含量超过 15% Zn 的合金暴露在 NH_4OH 会对 SCC 产生敏感。其应力很可能是由使用中的作用载荷或未经消除的残余应力所引起的。在室温和静止的 2*N* 的 NH_4OH 溶液里，铜锌合金以 1.8～6.6mm/a（70～260mil/a），铜-镍合金以 0.25～0.50mm/a（10～20mil/a），铜-锡合金以 1.3～2.5mm/a（50～100mil/a）以及铜硅合金以 0.75～5mm/a（30～200mil/a）的速率被腐蚀。

如果 NH_3 保持无水状态也没有混入水和氧气，那铜和铜合金适用于处置无水 NH_3。在大气的温度和压力条件下，C11200 和 C26000 与无水 NH_3 接触试验 1200h，它们分别都显示平均 5μm/a（0.2mil/a）的侵蚀深度。

盐

铜金属广泛应用于处置各种不同含盐溶液的设备上，特别是那些接近中性的溶液。其中有钠和钾的硝酸盐、硫酸盐和氯化盐。氯化物的腐蚀性通常甚于其他盐，尤其是在强烈搅拌和透气强的溶液里。

非氧化酸的盐如明矾和某些金属的氯化盐（氯化镁和氯化钙）在水里水解生成酸性 pH，基本呈现出与相应酸的稀溶液相同的特性。在室温下，其腐蚀速率范围一般为 2.5～1500μm/a（0.1～60mil/a），具体取决于透气的程度和酸度。

铜合金能很好地处置中性的盐溶液。所以这些合金适用于暴露在海水里的换热器和冷凝器。

像硅酸钠（Na_2SiO_3）、磷酸钠（Na_2CO_3）（原文如此，似为碳酸钠之误——译者注）这样的碱性盐，在室温下会以不同的低速率腐蚀铜合金。另一方面，碱金属的氰化物却会相当快速地侵蚀和腐蚀铜合金，因为它生成一种可溶性的复合铜阴离子。

氧化盐。它们会快速腐蚀铜合金，因此铜金属不应该与氧化盐溶液一起使用，除非那些非常稀的氧化盐溶液。含水重铬酸钠（$Na_2Cr_2O_7$）溶液能安全地用铜合金进行处置，但是作为一种高离子化酸，如 H_2CrO_4 或 H_2SO_4 的存在会提高腐蚀速率好几百倍，因为重铬酸盐就像酸溶液中的氧化剂一样起作用。在处置含水 $Na_2Cr_2O_7$ 溶液的试验中，铜-镍以 2.5～250μm/a

(0.1～10mil/a)，而铜-锡合金(磷青铜)以5μm/a(0.2mil/a)的速率被腐蚀。当在其溶液中加入H_2CrO_4，其腐蚀速率由此提高200～300倍。在含有Fe^{3+}、汞(Hg^{2+})或锡(S^{4+})离子的溶液中，铜-镍的腐蚀速率为27.4mm/a(1080mil/a)，而铜-锌和铜-锡合金的腐蚀速率仍较高，为228mm/a(8980mil/a)。

比铜更为惰性的金属的盐类如硝酸汞和硝酸银会快速腐蚀铜合金，同时将惰性金属镀于铜表面。温度和酸度会影响侵蚀的速率。如果合金内有拉应力，那么无论是残余应力还是作用应力，在高锌黄铜(大于15% Zn)表面上的汞膜都会通过液体-金属脆化(LME)而造成晶间开裂。

有机化合物

铜和许多铜合金都能抵御由有机溶剂和有机化合物，如胺、链烷醇胺、乙二醇、酯、乙醚、酮、乙醇、醛、石脑油和汽油引起的腐蚀。虽然铜和铜合金在纯的乙二醇和胺中的腐蚀速率是很低的，但是如果在这些化合物中混有水、酸、碱、盐或这些杂质的混合物，尤其在高温下，其腐蚀速率就会明显提高。

汽油。纯净的汽油、石脑油和其他烃类都不会侵蚀铜或任何铜合金。然而在烃类材料的制造过程中，工艺蒸汽有可能混有一种或多种像水、硫化物、酸和各种有机化合物的物质。这些杂质会侵蚀铜和铜合金。暴露在汽油中的C44300和C71500的腐蚀速率很低，并且这两种合金都能成功地应用于汽油的炼制设备中。

克鲁苏油。铜和铜合金适合与克鲁苏油一起使用，虽然克鲁酥油会侵蚀某些高锌黄铜。当合金C11000、C23000、C26000、C51000和C65500暴露在克鲁苏油中、温度为25℃(75℉)时，其腐蚀速率一般不超过500μm/a(2mil/a)(原文如此,似为“20mil/a”之误——译者注)。

亚麻油。铜和铜合金颇具对于亚麻油的耐腐蚀性。所有的合金都显示出有些侵蚀的发生，但所有的腐蚀都没有严重到不适合使用的地步。合金C11000、C51000和C65500在亚麻油中、温度为25℃(75℉)时的腐蚀率低于500μm/a(20mil/a)。合金C26000的腐蚀速率为500～1250μm/a(20～50mil/a)。

粗苯和苯。合金C11000、C23000、C26000、C51000和C65500在这些材料中，温度为25℃(75℉)时的腐蚀低于500μm/a(20mil/a)。

糖。铜能成功地应用于甘蔗和甜菜的两种制造设备中的真空盘加热盘管、蒸发器和汁液萃取器。耐腐蚀船舶铜、铝青铜和铜镍也能应用于汁液加热器和蒸发器的管子上。铜和铁的双金属管子已为甜菜糖的制造商所采用，用于防止铜管因为甜菜生长在经施肥的土壤里而沾染上NH_3，从而导致SCC的发生。

啤酒。铜在啤酒酿造中应用广泛。曾经在一装置中，铜锅的壁厚经过30年从16mm(⅝in)减薄到10mm(⅜in)。使用碱性化合物清洗铜制设备会使采用锡-铅的软钎焊料焊的接缝遭到侵蚀，而使用金属硬钎焊料BAg(铜-银)的钎焊可以消除这种损坏的可能性。在酿造设备中的蒸汽盘管要求比其他零件更加频繁的更换。它们只有15～20年的使用寿命。而在酿造过程里暴露在工艺蒸汽中的其他铜零件的使用寿命范围为30～40年。

硫化合物。它们易于与铜反应，硫化氢(H_2S)、硫化钠(Na_2S)或硫化钾(K_2S)都会生成CuS。反应的速率取决于合金成分，耐腐蚀性最强的就是那些高含锌量的合金(例如60Cu-40Zn)。

耐腐蚀船舶铜也是应用于换热器和冷凝器的优异合金，在其用途里可处置含硫的石油产品和使用水作为其冷却剂。合金C44300、C44400和C44500通过在以70Cu-29Zn-Sn为主的成分中加入砷、锑或磷，得到良好的耐硫腐蚀性能以及优异的耐换热器水侧污垢腐蚀的能力。

保护镀层

铜金属能在很多环境中耐腐蚀，因为它们在一开始暴露的时候就能与环境中的一种或多种组分发生反应，由此生成惰性的反应物成为表面保护层。在某些用途里，铜金属的耐腐蚀性可以通过使用金属或有机保护涂层得到提高。如果涂层材料能有足够的耐腐蚀性，使用寿命则取决于涂层在基体金属上的不渗透性、连续性和粘附性。涂层对于基体金属的电位关系也很重要，特别是对金属涂层和在未经涂层的边缘上。作为涂层广为应用的锡、铅和软钎焊料，一般都采用热浸的方法。电镀也有应用。

锡。它能对硫所造成的腐蚀起作用，作为用含硫橡胶绝缘的铜丝和电缆的涂层，它是最有效的。镀铅铜主要应用于屋面等用途上，这时有可能接触烟道气体或其他含有稀H_2SO_4的生成物质。锡或铅的涂层有时用于铜是为了在普通大气中的暴露，但这主要是为建筑上的效果，在乡村、都市、船舰和大多数的工业场合里裸铜的耐大气腐蚀效果都是非常好的。

电镀铬。它用于装饰、提高耐磨性或增加反射率。因为它有一些孔隙，故对于腐蚀保护不太有效。对于重要的腐蚀防护最常用的方法是在电镀铬的下面先电镀一层镍的保护层。

各种有机涂层。用于铜合金保持光亮的金属外观。

第3章　镁和镁合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，455～479页；《ASM手册》第13卷腐蚀，1987，740～754页。其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

第1节　选择与应用

镁和镁合金在各种结构用途上的广泛地应用是得益于它们在抗拉强度（160～365MPa或23～53ksi）、弹性模量（45GPa或6.5×10^6psi）和低密度（$1.74g/cm^3$，铝的2/3）等性能上令人满意的结合。镁合金相对于其他结构金属具有很高的强度-重量比（抗拉强度/密度）。镁有相对较好的电导率（38.6IACS）和热导率[154.5W/(m·K)或89.2Btu/(ft·h·℉)]。它还具有非常高的阻尼缓冲能力即能吸收弹性振动的能力。

对设计人员来说，主要有两种镁合金可供使用。第一种包括含有2%～10%Al的合金，再结合微量的锌和锰。这种合金的广泛应用在于其成本适中和要求在95～120℃（200～250℉）温度以下有良好力学性能的场合。超此温度，其性能就要随温度的升高而急剧下降。第二种在镁中加入除铝以外的其他不同合金元素（稀土、锌、钍、银和硅），所有含有少量且有效的锆的合金都能细化其晶粒组织（以此改善力学性能）。这种合金具有较好的高温性能，但是由于要有较贵的合金加入，并要求采用特殊的制造技术，故其成本很高。

在固体镁中铝和锌相对易溶，但它们的溶解度在低温下会降低。铝的溶解度（质量分数）在437℃（819℉）为12.7%和在93℃（200℉）为3.0%，锌的溶解度（质量分数）在340℃（644℉）为6.2%和在204℃（400℉）为2.8%。锰、锆和铈（质量分数）在482℃（900℉）为<1.0%。在共晶温度下钍在镁中的溶解度为4.5%。锰能有效地改善含铝和锌的镁合金的腐蚀稳定性。其中有几种合金利用锰来控制含铁量及其在合金中的活泼程度，并具有优异的耐腐蚀性。其他不含铝、锌而含有钇的合金也有供货，并展示其良好的耐腐蚀性。

镁工业

蕴藏和生产

镁是在地壳中的蕴藏量占第八和在海水中的溶解量占第三的元素。它构成地壳的～2%，在海水中的含量为～$1.3kg/m^3$的Mg^{2+}离子（或～0.14%Mg）。镁和镁的化合物可以从海水，从含盐的井水和湖水，以及从诸如菱镁矿、白云石（最为普通的矿石）和橄榄石中提取。

电解工艺。世界上大量的镁都是采用电解工艺生产的，首先通过石灰、磨细的牡蛎壳或经煅烧的白云石在海水里沉淀出镁化合物。将海水与石灰石置于一个很大的沉淀池中相混合（熟石灰或镁石灰），在里面不溶解的氢氧化镁就会沉淀到池底。氢氧化镁稀浆再从池底泵出，进入过滤器浓缩后等候进一步处理。

一种方法，用盐酸将沉淀的氢氧化镁转变为氯化镁，干燥后倒入电解池。在电解过程中形成的氯气转变为盐酸供循环使用。另一种方法，将氢氧化镁进行干燥和煅烧生成氧化镁，让其与电解池出来的氯气反应并与碳生成无水氯化镁用于装入电解池内。

在电解池里，电流将氯化镁分解为熔化镁和氯气。镁金属流出铸成粗锭，通过重熔成为按规定的最低含镁量99.8%～99.98%（ASTM B92规定了这种镁锭的成分要求）。氯气收集后仍以气体的形式回收予以利用。

另一种电解工艺使用采自盐湖（如犹他州的大盐湖）里的天然盐水并经过浓缩的氯化镁或沉淀盐作为原材料。用于生产镁和氯。还有一种电解工艺利用在石棉矿尾矿中含的硅酸镁获取氯化镁。用强盐酸从这种尾矿中提取氯化镁。

热还原工艺。在热还原中一般将白云石（$MgCO_3 \cdot CaCO_3$）作为氧化镁的来源使用。最早开发的工艺中，将粉末状的白云石石灰和硅铁混合、制坯，然后在真空的耐热钢蒸馏罐的～1150℃（2100℉）温度中加热数小时。镁从坯块中挥发出来，并凝固形成镁晶体。这些晶体沉积在一个可移动的、插在蒸馏罐冷端的套筒上。随后，将沉积物从套筒上刮下，在助熔剂的保护下熔炼，铸成锭块。

在最近开发的工艺中，硅铁、矾土或铝矾土以及经煅烧的白云石被倒入熔炼床里。给熔炼床通上电流提供反应所需要的热量（电阻加热，温度为1500℃或

2730℉)。这种工艺能使经煅烧的白云石中所含氧化镁的还原进行得比前面所介绍的热工艺更快、量也更大。从还原炉里逸出的镁蒸汽，在一个水冷的坩埚里面冷凝。该装置可以从还原炉中取出，固态的冷凝物再进行熔炼、精炼和铸成锭块。

镁的应用

镁和镁合金广泛地应用于各种结构和非结构用途里。表3.3-1列出了近来国内(美国)镁金属的终端应用统计。镁的化合物主要为氧化镁，主要作为耐火材料，用于生产铁和钢、非铁金属、玻璃和水泥等的炉子内衬。在美国所生产的75%镁化合物都应用于耐火材料。

表3.3-1 美国1996年镁的主要消耗

应 用	t[①]	(%)
结构用途		
铸件	16400	16
压铸型	14700	
金属型	1180	
砂型	520	
锻压件[②]	8080	8
结构用合计	24500	24
非结构用途		
铝合金化	52300	51
阴极保护(阳极)	5450	5.5
化学物质	331	<1.0
铁和钢脱硫	13700	13.5
金属还原剂	2340	2.5
其他元素[③]	3630	3.5
非结构合计	77800	76
所有应用合计	102000	100

①数据圆整到三位有效数字，故各项应用数值相加可能不足合计数值。 ②包括挤压件、薄板和厚板，及锻件。 ③包括球墨铸铁、精炼添加剂、脱氧剂和粉末所使用的。

引自美国地质调查，矿产信息。

结构应用。大部分用于压铸件，占所报告总消耗量的~24%。用途包括汽车、工业、材料储运、民用和航天设备。汽车用途包括仪表板支梁、制动器和离合器踏板支架、进气格栅、转向柱支架、转向柱支座、座椅背框架和座椅底架以及电池箱(电动车用)。按1997年型的轿车估计，每一辆车含有约2.9kg的镁。比前一年的2.5kg增加16%。有些车的含镁量比此高得多。例如，面包车里的每一副压铸座椅组件(背框架和底架)，根据其车型重从4.1~6.8kg。在工业用机器如纺织和印刷机械里，镁合金用于一些高速运行的零件上，它们必须保持很轻的重量，以使惯性力最小。材料储运设备包括装卸板、谷物铲车和重力输送机。民用的包括手动工具、计算机机箱和手机外壳。镁合金在航天应用中是极富价值的，因为它们既重量轻又能在室温和高温下表现出良好的强度和刚度。用镁合金制造的航空器件包括直升机的主变速箱箱体和民用及军用飞机的齿轮箱箱体。

非结构应用。镁是铝合金中的重要组分，事实上镁的最大用途是作为铝合金的组分(占所报告消耗量的51%)。在锻压合金中加入高达5%和在铸造合金中加入高达10%的镁，可以使铝合金得到强度、成形性(锻压制品)和耐腐蚀性令人满意的性能组合。镁还可以作为一种脱氧剂和脱硫剂用于镍和铜合金的生产，作为脱硫剂用于钢、铁工业，作为还原剂用于铍、钛、锆、铪和铀的生产。镁的另一种重要的非结构应用就是在有机化学的Grignard反应中的使用。进一步细分，镁可以作为纯镁和含有30%或更多的铝在烟火中得到使用。鉴于其在电动序中的相对位置，镁能用于作为其他金属腐蚀的阴极保护，并在干电池的结构、海水和储备电池组中使用。灰铁在铸造时使用镁或含镁合金作为浇包的添加剂并且在正要浇注前加入。镁能使石墨颗粒球化，以此大大改善铸铁的韧性和塑性。镁还能用于照相制版，这是由于它对刻蚀具有响应快速又可控以及重量轻。

再生镁

铝饮料罐已经成为镁的供-求关系中的一个重要因素。在20世纪70年代中期铝合金开始大量地应用于饮料罐，并且赢得了几乎100%的饮料罐市场。这也对镁的消耗产生明显的影响，因为铝罐中含有~2.5%Mg。铝的这种机遇也给再生镁带来深刻的影响。铝罐被消费者回收，一些镁含量也随之回收，回收的镁已成为在美国的镁生产中的基本部分(~35%)，80%的回收镁来自含镁铝的废料。有关镁的再生回用的更详细内容可参阅本手册(下册)第4篇第10章。

合金和状态的代号

镁合金最常用的代号是由ASTM建立的系统所规定的，它包含化学成分和状态。表3.3-2总结了这个

表3.3-2 适用于镁和镁合金的ASTM系统合金和状态代号的四部分标准

第一部分	第二部分	第三部分	第四部分
表示两种主要合金元素	表示两种主要合金元素的含量	区分具有相同主要合金元素百分比的不同种合金	表示状态
用两个代码字母代表两种合金元素，按其百分比数量递减而排序（如两者相等则按字母排序）	由两个代表主要元素的、经圆整到个位的百分比数字组成，按第一部分字母的顺序排列	按序用一个字母代表已经标准化的成分	用一个字母跟一个数字表示（与代号的第三部分之间用连字符分隔）
A，铝 B，铋 C，铜 D，镉 E，稀土 F，铁 G，镁 H，钍 K，锆 L，锂 M，锰 N，镍 P，铅 Q，银 R，铬 S，硅 T，锡 W，钇 Y，锑 Z，锌	所有的数字	A，在ASTM登记的第一组组成； B，在ASTM登记的第二组组成； C，第三组组成； D，在ASTM登记的高纯度合金； E，高耐腐蚀； X1 未曾在ASTM登记	F，直接加工后； O，退火； H10、H11，轻微变形硬化； H23、H24和H26，变形硬化和局部退火； T4，固溶处理； T5，仅人工时效； T6，固溶处理和人工时效； T8，固溶处理、冷变形加工和人工时效

注：分析见正文。

系统。下面以镁合金AZ91E-T6为例子说明该系统是如何规定的。代号的第一部分AZ表示铝和锌是其主要合金元素。代号的第二部分91是经圆整的铝和锌的百分比（分别为9%和1%）。第三部分E表示它是同样以9% Al和1% Zn作为主要合金元素的标准化合金中的第五种。第四部分T6代表合金经固溶处理和人工时效。ASTM的标准B296规定了镁合金的状态。

主要镁金属和镁合金还用统一编号系统（UNS）的代号命名。编号M10001 ~ M19999留给镁和镁合金。从后面段落中的成分表可对照ASTM和UNS的合金代号。

铸造合金

压铸合金

镁采用压力铸造是很理想的。在镁合金中的低熔化潜热可使其在模具中快速凝固，形成高生产率。熔化的镁并不会熔焊在模具钢上或与其发生反应，使模具有较长的寿命从而提高生产率（模具的寿命比用于铝的长二至三倍）。

一般工业上用的高压压模铸造有三种镁合金系统：Mg-Al-Zn-Mn（AZ）、Mg-Al-Mn（AM）和Mg-Al-Si-Mn（AS）。表3.3-3和表3.3-4分别给出了这些合金的常规成分和拉伸性能。压铸件能以直接铸造状态使用。

最常用的镁压铸合金为AZ91D。它具有良好的力学和物理性质，同时结合有优异的铸造性和耐盐水腐蚀性。高纯度的AZ91D的优异耐盐水腐蚀性主要得益于对铁、镍和铜的三种关键杂质含量的控制。高纯度AZ91D合金现已替代不太纯的AZ91B成为其压铸件的主流。AZ91B仍在应用因为它易于利用废料或再生金属进行生产。这种能降低成本的替代适用于耐腐蚀性不是很重要的一些用途，例如在非腐蚀环境中的油漆零件。镁压铸件的标准技术规范归属于ASTM B94。

表3.3-3 镁铸造合金的常规成分

合金		化学成分（质量分数，%）						
ASTM编号	UNS编号	Al	Mn①	Zn	Th	Zr	稀土	其他
砂型和金属模铸件								
AM100A	M10100	10.0	0.1	0.3	—	—	—	—
AZ63A	M11630	6.0	0.15	3.0	—	—	—	—
AZ81A	M11810	7.6	0.13	0.7	—	—	—	—
AZ91C	M11914	8.7	0.13	0.7	—	—	—	—

（续）

合金		化学成分(质量分数,%)						
ASTM 编号	UNS 编号	Al	Mn①	Zn	Th	Zr	稀土	其他
砂型和金属模铸件								
AZ91E	M11918	8.7	0.13	0.7	—	—	—	0.005Fe②
AZ92A	M11920	9.0	0.10	2.0	—	—	—	—
EQ21A	M12210	—	—	—	—	0.7	2.25③	1.5Ag
EZ33A	M12330	—	—	2.55	—	0.75	3.25	—
HK31A	M13310	—	—	0.3	3.25	0.7	—	—
HZ32A	M13320	—	—	2.1	3.25	0.75	0.1	—
K1A	M18010	—	—	—	—	0.7	—	—
QE22A	M18220	—	—	—	—	0.7	2.15③	2.5Ag
QH21A	M18210	—	—	0.2	1.1④	0.7	1.05③④	2.5Ag
WE43A	M18430	—	0.15	0.2	—	0.7	3.4⑤	4.0Y
WE54A	M18410	—	0.15	0.2	—	0.7	2.75⑤	5.0Y
ZC63A	M16331	—	0.25	6.0	—	—	—	2.7Cu
ZE41A	M16410	—	0.15	4.25	—	0.7	1.25	—
ZE63A	M16630	—	—	5.75	—	0.7	2.55	—
ZH62A	M16620	—	—	5.7	1.8	0.75	—	—
ZK51A	M16510	—	—	4.55	—	0.75	—	—
ZK61A	M16610	—	—	6.0	—	0.8	—	—
压铸件								
AM60A	M10600	6.0	0.13	0.22	—	—	—	0.5Si；0.35Cu
AS41A	M10410	4.25	0.20	0.12	—	—	—	1.0Si
AS41B	M10412	4.25	0.35	0.12	—	—	—	1.0Si
AZ91A	M11910	9.0	0.13	0.7	—	—	—	0.5Si
AZ91B	M11912	9.0	0.13	0.7	—	—	—	0.5Si；0.35Cu
AZ91D	M11916	9.0	0.15	0.7	—	—	—	—
AM60B	M10602	6.0	0.24	0.22	—	—	—	—
AM50A	M10500	4.9	0.26	0.22	—	—	—	—

①最小。　②如果铁超过0.005%，那么铁与锰之比不应超过0.032。　③稀土元素以镨钕的形式存在(一种主要由钕和镨组成的稀土元素混合物)。　④钍和镨钕的总量为1.5%~2.4%。　⑤WE43A和WE54A分别含有稀土2.0%~2.5%和1.5%~2.0%Nd，其余的为重稀土。

表3.3-4 镁合金的最低力学性能

合金-状态	抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	HB
	MPa	ksi	MPa	ksi		
砂型和金属模铸件						
AM100A-T6	241	35	117	17	—	69
AZ63A-T6	234	34	110	16	3	73
AZ81A-T4	234	34	76	11	7	55
AZ91C-T6	234	34	110	16	3	70
AZ91E-T6	234	34	110	16	3	70
AZ92A-T6	234	34	124	18	1	81
EQ21A-T6	234	34	172	25	2	78
EZ33A-T5	138	20	96	14	2	50
HK31A-T6	186	27	89	13	4	66
HZ32A-T5	186	27	89	13	4	55
K1A-F	165	24	41	6	14	—
QE22A-T6	241	35	172	25	2	78
QH21A-T6	241	35	186	27	2	—
WE43A-T6	221	32	172	25	2	85
WE54A-T6	255	37	179	26	2	85
ZC63A-T6	193	28	125	18	2	60
ZE41A-T5	200	29	133	19.5	2.5	62
ZE63A-T6	276	40	186	27	5	—
ZH62A-T5	241	35	152	22	5	70
ZK51A-T5	234	34	138	20	5	65
ZK61A-T6	276	40	179	26	5	70
压铸件						
AM50A	200	29	110	16	10	—
AM60A 和 B	220	32	130	19	8	—
AS41A 和 B	210	31	140	20	6	—
AZ91A，B，和 D	230	34	160	32	3	—
挤压棒材、杆料和型材						
AZ31B-F	220~240	32~35	140~150	20~22	7	—
AZ61A-F	260~275	35~40	145~165	21~24	7~9	—
AZ80A-F	290~295	42~43	185~195	27~28	4~9	—
AZ80A-T5	310~325	45~47	205~230	30~33	2~4	—
M1A-F	200~205	29~32	—	—	2~3	—
ZK40A-T5	275	40	255	37	4	—
ZK60A-F	295	43	215	31	4~5	—
ZK60A-T5	295~310	43~45	215~250	31~36	4~6	—
锻件						
AZ31B-F	234	34	131	19	6	—
AZ61A-F	262	38	152	22	6	—
AZ80A-F	290	42	179	26	5	—
AZ80A-T5	290	42	193	28	2	—
HM21A-T5	228	33	172	25	3	—
ZK60A-T5	290	42	179	26	7	—
ZK60A-T6	296	43	221	32	4	—
薄板和厚板						
AZ31B-O	221	32	—	—	9~12	—
AZ31B-H26	241~269	35~39	145~186	21~27	6	—
HK31A-O	200~207	29~30	97~124	14~18	12	—
HK31A-H24	228~234	33~34	172~179	25~26	4	—
HM21A-T81	234	34	172	25	4	—
LA141A-T7	124~131	18~19	103	15	10	—
ZE10A-O	200~207	29~30	83~124	12~18	12~15	—
ZE10A-H24	214~248	31~36	138~172	20~25	6	—

注：性能的范围取决于试验所用试件的规定厚度或直径。

对于要求比 AZ91D 所能提供的更高塑性的用途，可以使用高纯度压铸合金 AM50A 和 AM50B。AM50A 和 AM50B 具有比 AZ91D 更好的塑性和韧性。尽管 AM50A 和 AM50B 的含铝量降低了，但是其抗拉强度和屈服强度只比 AZ91D 稍有下降。AM60B 合金用于以压铸生产的汽车飞轮以及射箭和其他运动器材上。AM50A 合金可以用于甚至要求比 AM60B 更高塑性的用途。与 AM50A 和 AZ91D 一样，AM60B 表现出优异的耐盐水腐蚀性。

压铸合金 AS41A 在高达 175℃(350℉)温度下的

蠕变强度也远高于 AZ91D、AM50A 或 AM60B 合金，它也有较好的伸长率、屈服强度和抗拉强度。AS41A 合金用于空冷发动机的曲轴箱上。AS41B 是一种高纯度的 AS41A，它具有优异耐盐水腐蚀性。

半固态铸造合金

镁合金除了易于用液态的熔化金属进行直接浇铸外，还可以用半固态的压铸浆料成形镁合金。“触变成形”工艺就是将压铸与注射成型两种技术的特点相结合，目前应用于生产电动车辆的合金 AZ91D 蓄电池外壳。

砂型和金属模铸造合金

有若干种镁合金系统适用于砂型和金属模铸件：

- 含和不含锌的 Mg-Al-Mn(AM 和 AZ)；
- Mg-Zr(K)；
- 含和不含稀土的 Mg-Zn-Zr(ZK、ZE 和 EZ)；
- 含和不含锌的 Mg-Th-Zr(HK、HZ 和 ZH)；
- 含稀土或钍的 Mg-Ag-Zr(QE 和 QH)；
- Mg-Y-稀土-Zr(WE)；
- Mg-Zn-Cu-Mn(ZC)。

表 3.3-3 和表 3.3-4 给出了这些合金的常规成分和拉伸性能。ASTM B80 和 B199 分别规定了镁的砂型和金属模铸件的标准技术规范。

镁-铝铸造合金。以铝为主要合金成分的镁砂型和金属模铸造合金(AM100A、AZ63A、AZ81A、AZ91C、AZ91E 和 AZ92A)具有良好铸造性、塑性，以及高达 120℃(250℉)温度下适度的高拉伸性能。在这些合金中 AZ91E 尤为突出，由于其超级耐腐蚀性而几乎能完全代替 AZ91C。在 AZ91E 中，铁、镍和铜的杂质都控制在非常低的水平上，故表现出优异的耐盐水腐蚀性。

在任何一种 Mg-Al-Zn 合金中，对于相似的热处理，含铝量的增加可提高其屈服强度，但会降低其塑性。特定成分的最终选择将取决于成品铸件的试验。

KIA 合金。它主要应用于要求有高阻尼缓冲性的用途上。它的抗拉强度和屈服强度较低。

高含锌量合金。高含锌量的镁合金(ZK51A、ZK61A、ZE63A、ZH62A 和 ZC63A)是在铸造合金中具有最高的屈服强度，还能铸造成复杂的形状。然而，这些牌号都比 AZ 系列合金的成本高。因此，这些合金应用于对屈服强度有特别要求的用途。它们主要适合在室温里使用。

因为 ZK61A 有较高的含锌量，其强度明显高于 ZK51A(表 3.3-4)。经过人工时效处理(T5)这两种合金都能保持高塑性。通过固溶处理并人工时效(T6) ZK61A 的强度还能进一步得到提高(3%~4%)，而降低其塑性。这两种合金都有等同于 Mg-Al-Zn 合金的疲劳强度，但是它们对于显微疏松和热开裂较为敏感且焊接性也稍差。无论加入钍还是稀土金属都可以克服这些不足。ZE63A 的强度性能相当于 ZK61A，而 ZH62A 的强度性能相当于或优于 ZK51A(表 3.3-4)。

合金 ZE63A 是一种具有优异抗拉强度和屈服强度的高强度牌号合金，这些超级性能是通过在氢气氛中的热处理而获得的。因为由表面产生的氢化，热处理时间、壁厚及其可穿透性都是一些制约性因素。这种合金具有优异的铸造特性。

相对 AZ91C 和 AZ92A 而言，ZE41A 用于满足不断增长的、要求有中等强度、良好的焊接性能和高铸造性的合金需求。它有良好的疲劳、蠕变性能，并最大限度地免除显微收缩性。不像 AZ 合金，ZE41A 的分离铸造试棒与取自铸件本身的试棒即使其截面相对较厚，它们两者性能之间有着非常密切的关系。合金 ZE41A 可以用于温度高达 160℃(320℉)的用途，如飞机发动机、直升机和飞机骨架，以及飞机轮子和齿轮箱体。

合金 ZC63A 是一组新颖的镁合金，它既不含铝也不含锆。合金具有良好的可铸造性、压力致密性和可焊接性。它不需要晶粒的细化和硬化剂便可以获得性能，但是必须经热处理才能达到其性能的完美。该合金能在室温和中等高温里具有令人满意的性能。其耐腐蚀性类似于 AZ91C 而比 AZ91E 差一些。

Mg-稀土-Zr 合金。它们适用于 175 和 260℃(350 和 500℉)之间的温度。由于其高温强度超过 Mg-Al-Zn 合金，故可以使用较薄的壁厚，有可能减轻其重量。

Mg-稀土-Zr 合金 EZ33A 具有在高温下良好的强度稳定性(强度稳定性就是在高温中持续暴露时抵御强度衰减的能力)。这种合金对于某些设计比 Mg-Al-Zn 合金较难以铸造。EZ33A 铸件具有优异的压力致密性。先前讨论过的合金 ZE41A 类似于 EZ33A，但是因为其较高的含锌量而有较高的抗拉强度和屈服强度。为了得到较高的力学性能，其铸造性和焊接性要做出一些牺牲。

当发动机机体的运行温度从 120 升高至 205℃(250 升高至 400℉)时，合金 EZ33A-T5 可以成功地代替 AZ92A-T6。这个代替是以两种合金的分离式铸造试棒的蠕变试验为依据的，在 1000h 内发生 0.1% 蠕变时的应力值为：

合金	温度		应力	
	℃	℉	MPa	ksi
AZ92A-T6	205	400	6.9	1.0
	260	500	2.1	03
EZ33A-T5	205	400	58	8.4
	260	500	26	3.7
	315	600	8.3	1.2

Mg-Th-Zr 合金 HK31A 和 HK32A。主要是为了用于温度200℃(400℉)及其以上的用途，此时要求高于 EZ33A 所具有的性能。不过，这些合金由于环境方面的考虑而不受欢迎，一般认为是已废弃不用的。例如在英国，将含有少至2%钍的合金划归为需要特殊处置的放射性材料。然而许多含钍的镁零件仍在使用，一些配件还在生产。ASTM 标准里仍包括铸造和锻压的镁-钍合金。

为将性能完全开发出来，HK31A 要求进行 T6 处理(固溶处理加上人工时效)，而含锌的 HK32A 仅要求 T5 处理(人工时效)。HK31A 和 HK32A 的铸件都能在高达 345～370℃(650～700℉)的一些用途中使用。Mg-Zn-Th-Zr 合金 ZH62A 不同于其他的 Mg-Th-Zr 合金，后者主要在室温里使用。

Mg-Th-Zr 合金比 EZ33A 更难以铸造，因为它们对于因浇口扰动而造成的夹杂物和缺陷较为敏感。对于要求快速浇铸的薄壁零件，在其 Mg-Th-Zr 合金中形成夹杂物的倾向更为明显。为了生产从中到重型壁厚的复杂零件，这些合金有与之相适应的铸造性。

在 260℃(500℉)和再稍高的一些温度下，HZ32A 在短期和长期的整个持续期间的蠕变强度都与 HK31A 的相等或更好。在高达 370℃(700℉)的温度下，HK31A 合金具有较高的抗拉、屈服和短期蠕变强度。然而在高温中 HZ32A 有更高的强度稳定性，而且其铸造性也大大优于 HK31A。

镁-银铸造合金。银的存在能改善镁合金的室温强度。当随同银还有稀土或钍存在时，还能提高其高温强度。QE22A 和 EQ21A 牌号具有高抗拉强度和屈服强度，以及高达 205℃(400℉)温度下相当良好的性能。合金 QH21A 在室温下有与 QE22A 和 EQ21A 相似的性能，但是它能在从 205℃(400℉)至 260℃(500℉)的温度中表现出更好的性能。合金 QE22A、EQ21A 和 QH21A 都有良好的铸造性和焊接性。它们需要通过固溶和时效热处理来获得更高的力学性能。QE22A 和 QH21A 合金由于其银含量而较为昂贵，EQ21A 因含银量较低，故也相对不贵。

合金 WE54A 和 WE43A。它们有高抗拉强度和屈服强度，并且能展现分别高达 300℃(570℉)和 250℃(480℉)下的良好性能。WE54A 合金能在高温中保持其性能长达 1000h，而 WE43A 合金能在长达 5000h 的高温中保持其性能。合金 WE54A 和 WE43A 两者都有良好的铸造性和焊接性，但是它们需要进行固溶和时效热处理，用于优化它们的力学性能。它们由于含有钇而相对较贵。这两种合金都耐腐蚀，其腐蚀速率与普通的含铝铸造合金相似。

熔模铸造合金

熔模(失蜡)工艺用于铸造复杂零件和截面壁厚非常薄的零件，且要求低表面粗糙度和高尺寸精度的时候。像用砂型铸造一样，同样的合金也可以用这种工艺进行铸造。镁熔模铸造的标准技术规范包含在 ASTM B403 中。

锻压合金

锻压镁合金可以生产成为棒材、坯料、型材、薄板、厚板和锻件。表 3.3-5 列出这些合金的常规成分。锻压和铸造合金的拉伸性能均列于表 3.3-4 中。锻压产品的 ASTM 技术规范包括：

- B107(挤压棒材、圆棒、型材、管材和线材)；
- B91(锻件)；
- B90(薄板和厚板)。

表 3.3-5 锻压镁合金的常规成分

合金		产品形式①	化学成分(质量分数,%)					
ASTM 编号	UNS 编号		Al	Mn (最低)	Zn	Th	Zr	其他
AZ31B	M11310	F, S, E	3.0	0.20	1.0	—	—	—
AZ31C	M11312	S, E	3.0	0.15	1.0	—	—	—
AZ61A	M11610	F, E	6.5	0.15	0.95	—	—	—
AZ80A	M11800	F, E	8.5	0.12	0.5	—	—	—
HK31A	M13310	S	3.0	—	0.3	3.25	0.7	—
HM21A	M13210	F, S	—	0.45	—	2.0	—	—

(续)

合金		产品形式①	化学成分(质量分数,%)					
ASTM 编号	UNS 编号		Al	Mn (最低)	Zn	Th	Zr	其他
LA141A	M14141	S	1.25	0.15	—	—	—	14Li
M1A	M15100	E	—	1.6	—	—	—	0.3Ca
ZE10A	M16100	S	—	0.15	1.25	—	—	0.17RE②
ZK40A	M16400	E	—	—	4.0	—	0.45	—
ZK60A	M16600	F, E	—	—	5.5	—	0.45	—

①S, 薄板和厚板; F, 锻件; E, 挤压棒材、型材、管材和线材。 ②RE, 稀土。

挤压棒材和型材。它们可以用多种镁合金制造。作为通常的强度要求，通常都选用 Mg-Al-Zn(AZ)中的一种合金。这种合金的强度会随含铝量的增加而提高。合金 AZ31B 是一种应用广泛、具有良好成形性的中等强度牌号，它还广泛用于阴极保护。合金 AZ31C 是 AZ31B 的一种纯度较低的工业用品种，适用于不要求最高耐腐蚀性的轻型结构用途。M1A 和 ZM21A 合金能以比 AZ31B 更高的速度进行挤制，但是因为强度较低而应用有限。合金 AZ10A 的含铝量低，故强度也低于 AZ31B，但是它能够焊接之后不必消除应力。AZ61A 和 AZ80A 合金可以通过人工时效以进一步提高其强度(塑性由此有所降低)，AZ80A 不适宜用于中空型材。

合金 ZK60A 适用于一些要求强度高并具有良好韧性的用途。这种合金可热处理并通常以人工时效状态(T5)使用。合金 ZK40A 的强度较低，它比 ZK60A 更易于挤制，但是对于中空管状并有强度要求的应用受到限制。

合金 HM31A 具有中等强度。它适用于在从 150~425℃(300~800℉)的温度范围里要求有好的强度和抗蠕变性的用途。

锻件。锻件可以用 AZ31B、AZ61A、AZ80A、HM21A 和 ZK60A 制造。合金 HM21A 和 AZ31B 可以用于锤锻锻件(而其余的几乎都是用于压锻)。AZ80A 合金的强度大于 AZ61A 并且要求作为所有 Mg-Al-Zn 合金中最慢的变形速度。合金 ZK60A 基本上具有与 AZ80A 相同的强度但塑性更佳。为了开发出最佳性能，AZ80A 和 ZK60A 都要经热处理到人工时效的状态(T5)，AZ80A 可以进行 T6 的固溶处理、再进行人工时效，以此获得最大蠕变稳定性。合金 HM21A 可赋予 T5 的状态。这对于需要在高达 370~425℃(700~800℉)的温度下，具有良好的抗蠕变性的用途来说是十分有用的。

薄板和厚板。它们用 Mg-Al-Zn(AZ 和照相制版牌号,或 PE)合金、Mg-Th(HK 和 HM)合金以及 Mg-Li-Al(LA)合金轧制而成。

合金 AZ31B 是薄板和厚板用得最为广泛的合金，而且适用于多种的牌号和状态。它能用于高达 100℃(200℉)的温度下。HK31A 和 HM21A 合金适用于温度分别高达 315℃(600℉)和 345℃(650℉)的情况。然而 HM21A 具有很高的强度和抗蠕变性。

在镁中加人锂能使合金的密度非常小，并有良好的成形性。例如含有 14% Li 的 LA141A 具有的密度为 1.35g/cm³ 或仅为纯镁的 78%。镁-锂合金由于其低密度而仅限于航空上使用。

合金 PE(含 3.3% Al 和 0.7% Zn 的 AZ31B 的改进型)是一种有特殊性能的薄板，具有优异的平整度、耐腐蚀性和可蚀刻性。它被应用于照相制版上。

对于大多数的薄板材料而言，良好的成形性都是它们重要的性能要求。镁合金薄板的成形性可以近似地表示成能够承受将其绕着一根心棒弯曲 90°而不产生裂纹的能力。使薄板绕着弯曲而不开裂的心棒最小尺寸(即最小半径)取决于合金的成分和状态、材料的厚度以及温度(表 3.3-6)。在合适的温度和成形条件下，所有的镁合金都能深拉到差不多相等的压缩量。

表 3.3-6 镁薄板弯曲 90°的最小半径推荐值

合金及其状态	成形温度①							
	20℃ (70℉)	95℃ (200℉)	150℃ (300℉)	205℃ (400℉)	260℃ (500℉)	315℃ (600℉)	370℃ (700℉)	425℃ (800℉)
AZ31B-O	5.5*t*	5.5*t*	4*t*	3*t*	2*t*	—	—	—
AZ31B-H24	8*t*	8*t*	6*t*	3*t*	2*t*	—	—	—

（续）

合金及其状态	成形温度①							
	20℃（70℉）	95℃（200℉）	150℃（300℉）	205℃（400℉）	260℃（500℉）	315℃（600℉）	370℃（700℉）	425℃（800℉）
HK31A-O	6t	6t	6t	5t	4t	3t	2t	1t
HK31A-H24	13t	13t	13t	9t	8t	5t	3t	—
HM21A-T8	9t	9t	9t	9t	9t	8t	6t	4t

注：弯曲半径的数值为与薄板厚度的乘积。

力学性能

拉伸性能。表3.3-4列出了镁合金的力学性能。这些数值都是适用于铸件的最小值，并且是利用分离式铸造试件试验得到的。熔模铸件的抗拉强度不难与砂型及金属模的铸件相比：屈服强度、抗拉强度和伸长率会随冷却速率的变化而变化，并且一般都低于分离式铸造试棒的数值。

大多数镁合金都有抗拉强度与密度的比值和拉伸屈服强度与密度的比值，可以将其与其他普通结构材料的相比（见图3.3-1）。

压缩强度。压缩屈服强度定义为，相对于模量直线产生0.2%的偏差或偏移而需要的应力。对于铸件，压缩屈服强度约等于拉伸屈服强度。然而对于锻压合金，其压缩情况下的屈服强度比拉伸屈服强度要小得多。压缩屈服强度跟拉伸屈服强度的比值从合金M1A的~0.4变化到其他锻压镁合金的平均值~0.7。典型的不同镁合金的压缩屈服强度值如表3.3-7所列。

利用欧拉长柱公式可以计算承受轴向载荷，并有足够的稳定性以防止发生局部失效的镁合金圆柱体在其长圆柱范围内的最大设计应力（所谓长柱体就是它的长度和横截面使其在未超过其材料的弹性极限的应力作用下，会发生弯曲变形的一种圆柱体）。处于短柱范围内的镁合金，短柱体的最大设计应力则取决于所试验合金的强度和形式（所谓短柱体就是使它的长度和横截面在压缩载荷的作用下会因为塑性屈服和/或压碎而发生失效，但不会弯曲）。在实际应用中，柱体的最大设计应力被认为是材料的最小压缩屈服应力。现在已经有不同的公式用于计算中等长度柱体的最大设计应力（就是那些因发生弹性弯曲和塑性屈服和/或压碎相结合而失效的柱体）。

承载强度。在设计螺栓和铆钉的连接时，承载强度显得特别重要。承载屈服强度定义为在应力-应变曲线的初始直线部分产生等于2%孔直径的偏移量时要

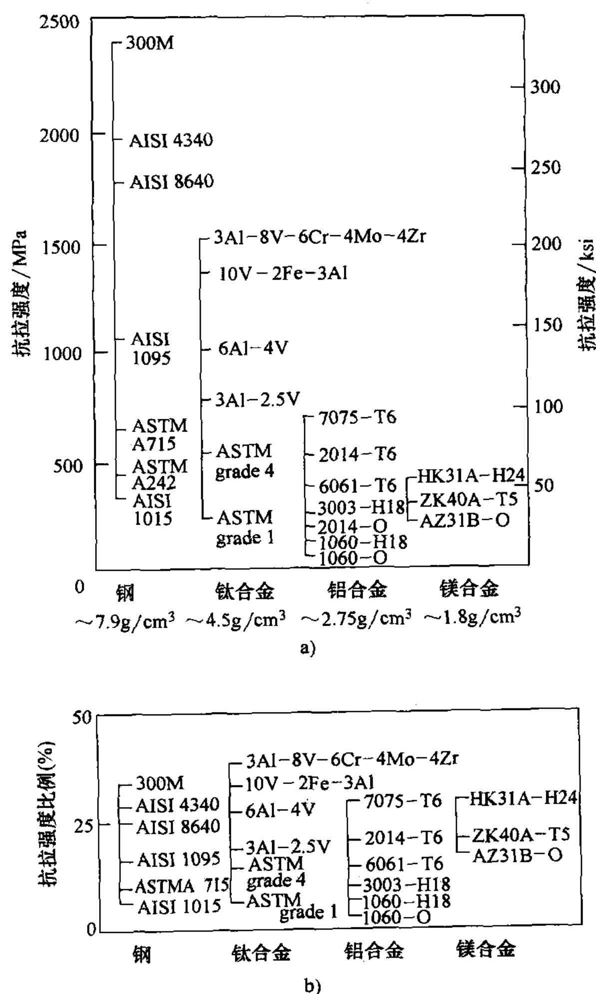


图3.3-1 结构合金材料按照抗拉强度和比抗拉强度进行的比较

a）抗拉强度 b）比抗拉强度

求的应力。表3.3-7中所测的承载强度值所用的试件是以等于孔销直径的2½倍为其边缘距离（从孔中心起算），以孔销直径的8倍为其宽度。将边缘距离增加到超过大约2倍的孔销直径对承载强度值几乎没有影

表 3.3-7　室温下所选的镁合金的压缩屈服强度、承载强度和抗剪强度

合　　金	压缩屈服强度		承载强度		抗剪极限	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
砂型和金属模铸件						
AM100A-T61	150	22	—	—	—	—
AZ63A-T6	130	19	360	52	145	21
AZ81A-T4	83	12	305	44	125	18
AZ91C-和 E-T6	145	21	360	52	145	21
AZ92A-T6	150	22	450	65	150	22
EQ21A-T6	195	28	—	—	—	—
EZ33A-T5	110	16	275	40	145	21
HK31A-T6	105	15	275	40	145	21
HZ32A-T5	90	13	255	37	140	20
K1A-F	—	—	125	18	55	8
QE22A-T6	195	28	—	—	—	—
WE54A-T6	172	25	—	—	—	—
ZE41A-T5	140	20	350	51	160	23
ZE63A-T6	195	28	—	—	—	—
ZH62A-T5	170	25	340	49	165	24
ZK51A-T5	165	24	325	47	160	23
ZK61A-T5	185	27	—	—	170	25
ZK61A-T6	195	28	—	—	180	26
压铸件						
AM60A-和 B-F	115	17	—	—	—	—
AS21X1	130	19	—	—	—	—
AS41A-F	150	22	—	—	—	—
AZ91A，B 和 D-F	165	24	—	—	140	20
挤制棒材和型材						
AZ10A-F	69	10	—	—	—	—
AZ31B 和 C-F	97	14	230	33	130	19
AZ61A-F	130	19	285	41	140	20
AZ80A-T5	240	35	—	—	165	24
HM31A-F	185	27	345	50	150	22
M1A-F	83	12	195	28	125	18
ZK21A-F	135	20	—	—	—	—
ZK40A-T5	140	20	—	—	—	—
ZK60A-T5	250	36	405	59	180	26
薄板和厚板						
AZ31B-H24	180	26	325	47	160	23
HK31A-H24	160	23	285	41	140	20
HM21A-T8	130	19	270	39	125	18

响。很大范围的薄板厚度已进行试验，并未发现孔销直径与薄板厚度的比值有任何影响，除了发生折曲。孔销直径不超过4倍的薄板厚度，能防止发生折曲。

抗剪强度。这对于镁零件的连接设计是很重要的，如螺纹连接和点焊。表3.3-7所列的铸件和挤压件的数值都是用传统的双剪法和使用实心圆棒得到的。而有关薄板和AZ80A-T5结构型材的数值是采用冲孔法并使用平试件得到的。

硬度和耐磨性。对于除那些会发生严重磨粒磨损以外的所有结构用途，镁合金有足够的硬度。表3.3-4列出其硬度值。尽管能看到有相当大的硬度差别，但合金磨粒磨损的耐磨性只是在~15%~20%间变动。当因摩擦、频繁的螺栓装卸或承受重载而造成磨损时，镁可以通过镶嵌钢、青铜或非金属材料进行保护，以诸如套管、轴瓦、垫板或衬套。这种镶嵌可以通过压配、热套、铆接、螺栓装配或粘结的机械连接予以实现；在铸件上，镶嵌能按照需要铸就。

镁合金作为支承材料，在承载不超过14MPa(2ksi)、轴径经硬化(350~600HB)、润滑充足、低速(最高5m/s或1000ft/min)和运行温度不超过105℃(220℉)的条件下可以得到满意的应用。

疲劳强度。用实验室的试样测定得到的镁合金疲劳强度就像其他金属的特征，都有分布较宽的离散带。其*S-N*曲线在斜率上有一渐进的变化，并且当达到一千万到一亿周循环时，趋向于与水平轴呈大致平行。

锻制品的疲劳强度比铸造试棒的更高。提高表面的光滑程度能改善其抗疲劳失效的能力。例如通过机械加工去除铸件上相对粗糙的铸造表面就能改善铸件的疲劳性能。锐利的缺口、小圆弧半径、微动磨损和腐蚀都比化学成分和热处理的变化更可能缩短疲劳寿命。

在合金ZK60A-T5(静态屈服强度290MPa或42ksi)的试件上加工出60°的缺口，其圆弧半径为0.025mm(0.001in)，则它在五亿周的循环载荷作用下的疲劳极限为28MPa(4ksi)，与之相比不带缺口的疲劳极限为110MPa(16ksi)。这时其缺口因数为0.25。对于一个以百万周循环的较短寿命而言，缺口

因数为~0.48。随缺口的严重度降低，它对疲劳极限的影响也急剧减小。例如半径为1.2mm(0.047in)的半圆形缺口，仅降低寿命20%，而同样在其上面的一个尖锐V形槽却要降低其75%。

当疲劳成为设计中的一个控制性因素时，应当尽一切努力降低应力升高的严重度。采用大的凹角圆弧半径和大小截面之间的缓变都可以大大增加疲劳寿命。还应当避免会导致应力增大的因素相互叠加的情况出现。采用导致长寿命的应力模式也能进一步改善疲劳强度。通过滚压或喷丸对关键部位的表面进行冷变形加工，以此得到的塑性变形能在表面形成残余压应力和提高疲劳寿命。

表面的圆弧滚压对于提高耐疲劳性特别有用，因为圆弧滚压之处就是高于正常应力的地方。在表面滚压过程中，通过控制辊子的大小和形状以及滚压的进给和压力，可以在适当的表面厚度(0.25~0.38mm或0.010~0.015in)层里获得特定的塑性变形。对于所有各种表面加工工艺都要注意防止产生导致寿命缩短的表面裂纹。例如采用喷丸，则所用的钢丸必须圆滑。使用破碎的钢丸或碎屑反而会造成表面裂纹。

阻尼缓冲能力。这是一种金属吸收弹性振动并使振动通过金属进行传递的能力。镁和镁合金具有优异的缓冲性，在许多用途中用于降低振动和噪声。这些用途包括用于会对振动产生敏感的电子设备的振动试验夹具和安装支架。镁合金的缓冲百分性与其他金属的比较如表3.3-8所示。

低温性能。镁合金的抗拉强度、屈服强度和硬度都随温度的降低而提高，但塑性会因此降低(室温和低温下的拉伸试验结果见表3.3-9)。

高温性质。高温对抗拉强度和屈服强度有负面的

表3.3-8　所列镁合金的缓冲性与其他金属的比较

合金	状态	缓冲性比值(%)				
		7.0MPa (1.0ksi)	14MPa (2.0ksi)	20MPa (3.0ksi)	25MPa (3.5ksi)	35MPa (5.0ksi)
镁合金						
AM60A, B	F	5.33	13.33	24.0	32.0	52.0
AS21A	F	16.0	33.33	48.0	53.33	60.0
AS41A, XB	F	5.33	13.33	21.33	28.0	44.0
AZ31B	F	1.04	1.57	2.04	2.38	2.72
AZ91 A, B, D	F	2.67	5.33	12.0	16.0	29.33
AZ92	F	0.17	0.45	2.09	5.54	—
	T4	0.50	1.04	1.29	2.62	3.78
	T6	0.35	0.70	1.64	3.08	4.78
EZ33A	T5	—	4.88	12.55	18.15	22.42
HK31	T6	0.37	0.66	1.12	—	—
HZ32A	T5	1.93	7.81	11.64	—	—
K1A	F	40.0	48.8	56.0	61.7	66.1
M1A	F	0.35	1.28	2.22	3.14	3.92
ZE41A	T5	1.86	1.94	2.02	2.06	2.19
铝合金						
355	T6	—	0.51	0.67	1.0	—
356	T6	0.3	0.48	0.62	0.82	1.2
铸铁	—	—	5.0	12.2	14.2	16.5

表3.3-9　所列铸造镁合金的低温拉伸性能

合　金	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	夏比冲击吸收功			
						缺口试件		无缺口试件	
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	lbf·ft	J	lbf·ft
24℃(75℉)									
AZ91C-T6	290	41.8	132	19.2	6.3	7.96	5.87	1.36	1.00
AZ92A-T6	290	41.8	160	23.4	4.0	7.62	5.62	0.68	0.50
EZ33A-T5	190	27.5	115	16.9	7.6	7.46	5.50	0.84	0.62
HK31A-T6	225	32.7	112	16.3	9.5	16.61	12.25	3.80	2.81
QE22A-T6	280	40.6	213	30.9	4.4	23.5	17.3	1.36	1.0
ZH62A-T5	275	39.9	192	27.9	5.7	15.02	11.08	1.02	0.75
-78℃(-109℉)									
AZ91C-T6	305	44.3	150	21.6	5.1	6.26	4.62	1.36	1.00
AZ92A-T6	295	42.7	170	24.6	2.3	6.44	4.75	0.76	0.56
EZ33A-T5	190	27.6	125	18.0	3.1	4.83	3.56	0.68	0.50

（续）

合　金	抗拉强度		屈服强度		伸长率（%）	夏比冲击吸收功			
						缺口试件		无缺口试件	
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	lbf·ft	J	lbf·ft
-78℃(-109℉)									
HK31A-T6	300	43.3	120	17.5	8.6	16.43	12.12	3.21	2.37
QE22A-T6	334	48.4	219	31.7	4.4	18.7	13.8	1.5	1.1
ZH62A-T5	330	47.6	200	29.2	2.7	18.99	14.00	1.02	0.75
-196℃(-321℉)									
AZ91C-T6	310	44.9	180	26.0	1.7	4.06	3.00	1.02	0.75
AZ92A-T6	320	46.5	195	28.5	0.8	4.57	3.37	0.68	0.50
EZ33A-T5	200	29.0	140	20.3	2.2	5.00	3.69	0.68	0.50
HK31A-T6	330	48.1	135	19.6	6.1	13.72	10.12	3.05	2.25
QE22A-T6	359	52.1	233	33.8	2.4	14.4	10.6	1.1	0.8
ZH62A-T5	320	46.6	235	34.1	1.0	8.56	6.31	1.02	0.75

注：铸造合金值为用分离式铸造棒的2~4次试验的平均值。

影响。高温对镁合金的力学性能可以通过以下几方面的考虑进行评价：①提高试件的温度并立即进行强度测试（短时间试验）；②在高温中持续加热时的温度下强度。③经在高温中进行短时间和长时间加热后对其室温性能的影响。④在载荷的持续作用下所发生的变形（蠕变试验）。

表3.3-10和3.3-11所列的数据表明高温对若干种镁合金力学性能的影响。

表3.3-10　高温对镁合金抗拉强度的影响

合　金	在所处的温度中试验										在室温中试验			
	10min						1000h				1000h			
	20℃(70℉)		150℃(300℉)		315℃(600℉)		205℃(400℉)		315℃(600℉)		205℃(400℉)		315℃(600℉)	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
铸件														
AZ63A-T6	275	40	165	24	55	8	110	16	—	—	255	37	—	—
AZ92A-T6	275	40	195	28	55	8	115	17	—	—	270	39	—	—
EQ21A-T6	261	37.9	211	30.6	132	19.1	—	—	—	—	246	35.7	—	—
EZ33A-T5	160	23	145	21	83	12	130	19	76	11	170	25	180	26
HK31A-T6	215	31	195	28	125	18	180	26	62	9	240	35	180	26
HZ32A-T5	200	29	145	21	83	12	115	17	76	11	220	32	235	34
QE22A-T6	266	38.6	208	30.2	80	11.6	—	—	—	—	—	—	—	—
QH21A-T6	275	40	235	34	97	14	—	—	—	—	—	—	—	—
ZC63A-T6	242	35.1	179	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ZE41A-T5	218	31.6	167	24.2	77	11.2	—	—	—	—	—	—	—	—
ZH62A-T5	290	42	195	28	69	10	—	—	—	—	—	—	—	—
WE43-T6	265	38.4	243	35.2	163	23.6	—	—	—	—	250	36.3	—	—
WE54-T6	280	40.6	255	37.0	184	26.7	235	34.1	—	—	272	39.5	217	31.5

（续）

合　金	在所处的温度中试验										在室温中试验			
	10min						1000h				1000h			
	20℃（70℉）		150℃（300℉）		315℃（600℉）		205℃（400℉）		315℃（600℉）		205℃（400℉）		315℃（600℉）	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
挤压件														
AZ80A-T5	380	55	235	34	69	10	—	—	—	—	—	—	—	—
ZK60A-T5	365	53	180	26	41	6	—	—	—	—	315	46	315	46
HM31A-F	275	40	195①	28①	115	17	—	—	—	—	—	—	—	—
薄板														
AZ31B-H24	285	41	145	21	48	7	90	13	62①	9①	255	37	260	38
HK31A-T6	255	37	180	26	115	17	—	—	55	8	255	37	215	31
HM21A-T8	235	34	140	20	97	14	—	—	—	—	—	—	—	—

①试验温度为260℃（500℉）。

表3.3-11　高温对镁合金蠕变应力和弹性模量的影响

合　金	蠕变应力①				弹 性 模 量			
	205℃（400℉）		315℃（600℉）		205℃（400℉）		315℃（600℉）	
	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi	GPa	10^6psi
铸件								
AZ92A-T6	3.4	0.5	—	—	31	4.5	21	3.0
EQ21A-T6	62	9.0	—	—	41	6.0	33	4.8
EZ33A-T5	38	5.5	6.9	1.0	40	5.8	38	5.5
HK31A-T6	64	9.3	14	2.0	40	5.8	39	5.6
HZ32A-T5	52	7.5	22	3.2	40	5.8	39	5.6
QE22A-T6	55	8.0	—	—	37	5.4	31	4.5
ZC63A-T6	49	7.1	—	—	—	—	—	—
ZE41A-T5	31	4.5	—	—	41	6.0	24	3.5
ZH62A-T5	17	2.5	—	—	40	5.8	38	5.5
WE43A-T6	96	13.9	—	—	39	5.6	37	5.4
WE54A-T6	132	19.1	—	—	41	6.0	36	5.3
挤压件								
ZK60A-T5	7	1.0②	—	—	—	—	—	—
HM31A-F	83	12.0	41	6.0	40	5.8	38	5.5
薄板								
AZ31B-H24	7	1.0②	—	—	30	4.3	17	2.5
HK31A-T6	69	10.0	17	2.5	40	5.8	25	3.6
HM21A-TB	76	11.0	34	5.0	40	5.8	34	5.0

①铸造合金历时1000h和锻压合金历时100h产生0.2%蠕变应变时的应力。　②试验温度为150℃（300℉）。

许多在高温和连续载荷作用下应用的零件都要根据最大允许变形进行设计。如表3.3-11所列的蠕变应力限制值，按照的是其总延伸量为0.2%。含钍合金具有在205~315℃(400~600℉)温度下的最大抗蠕变性，而Mg-Al-Zn合金的抗蠕变性为最小。作为Mg-Al-Zn合金的一种特征，其弹性模量随温度的升高而降低；但是对于含钍合金这种降低相当的小。

产品形式的选择

针对结构用途选择一种特定产品形式的依据是，其对力学性能的要求、成本、市场可供性以及制造性。生产和设计的要求会因运行条件或需求的增加而改变。以前用棒材毛坯加工的零件，以后可以用挤压或锻造的方法制造。由薄板和挤压件连接而成的组合件，可以作为同等功能的铸件进行重新设计而获得较低的成本。

铸件。有些零件太复杂，很难用其他较为经济的方法进行制造，就只能用铸造生产。砂型、金属模和压铸的铸件比熔模铸件得到更加广泛的应用。铸造方法的选择主要取决于铸件的大小、形状、数量、成本和铸件所要求的力学性能。熔模工艺的缺点在于其铸件的成本即设备投资和单件两者的成本比较高。而且对其所能生产的铸件尺寸也有很大的限制。

镁合金铸件的成本在很大程度上取决于其锭块的价格、合金的铸造性和所要求的热处理。锭块的价格随稀土金属、锆、银和钍的加入而提高。成分的少量变化还会影响热处理的成本。

当要求的零件数量足以分摊高额的设备成本时，镁合金就可以用金属模进行铸造。砂型和金属模两种铸件的力学性能还是可以相比拟的，但是金属模工艺通常能更严格地控制尺寸并获得较好的铸造表面。

铸件成本还要受到像要求的公差、模型和模具成本，以及切削加工成本的一些因素的影响。在寻求一种经济的生产方法时，产品的生产数量是一个影响其成本的重要因素。

选用镁合金制造的压铸件而不用同样设计的铝压铸件是为了减轻重量。镁压铸件还能代替钢组装件、锌压铸件和塑料。使用要求和尺寸会决定是否选择镁合金压铸件，但数量是最重要的因素因为压铸件毕竟是一种高生产率的产品。

就像一般的铸件一样，镁合金压铸件都是以单件进行计价或采购的。每一磅的成本随着设计的复杂程度、壁厚、铸型中的空腔数以及质量水平而变化。

挤压件。镁合金可以挤压成圆棒和各种不同类型的棒材、管材和型材。还能挤压出名目繁多的特种型材。采用挤压作为生产某种型材的方法是在下列情况下：①能通过几种小挤压件或挤压件与薄板的组合的连接构成一个组装件；②所要求的型材若用铸件切削加工而成则不太经济；③能用挤压件切断而成的切割件代替单个的铸造或锻压零件。

挤压工艺提供了许多设计的可能性，若采用其他生产方法实现这样的设计就很不经济。这些设计包括凹角和凹槽、大直径的薄壁管和不同截面的变化，而且几乎不受限制。决定一种镁合金型材能否很好地进行挤压的最为重要的因素是好的对称性，最好具有围绕两根轴的对称性。

应当避免那种带有大外接圆的非常薄且宽的截面。镁挤压件的最佳宽厚比(w/t)通常小于20。更大的宽厚比也可以挤压但是要求有较大的公差。截面由粗逐渐到细的楔形挤压模一定要将其刃口修圆，否则挤压模将不易进料。若挤压件的厚体结构上带有薄筋，则需限制筋的长度不得超过其厚度的10倍。应当避免要求挤压模有细长模舌的半闭合型材。作为最佳挤压性，模舌的长度不宜超过其宽度的3倍，尽管挤压的长宽比达到5倍也有可能。同样，要求模舌不均衡的型材也成不了好的挤压件设计。具有不对称空腔或者其空腔为厚度不适的截面所分隔的中空型材，都是挤压所不希望有的结构。

型材的尖锐外角会造成模具的应力集中以至破裂，应予以避免。而其内角也要成为圆角，以减小零件的应力集中并在挤压过程中确保模具的完全贴合。无论何种挤压型材，都很难让薄壁截面之间的距离保持在严格公差之内。

许多型材都能经济地进行挤压。挤压模相对而言也不太贵，产品尺寸可以有足够的精度而不必再进行切削加工。

冲击挤压件。它们是一种具有对称形状的管状零件。冲击型的热挤压尤其适用于：

- 用其他方法制造这种零件都不适用，例如要求壁厚非常薄的零件，而且零件还必须同时有高强度的薄壁和不规则的轮廓形状；
- 要求高生产率，若用其他方法制造都会产生过多的切屑废料，用压力铸造又无法满足其强度要求，采用冲击挤压可以使装配的制造工序数和零件数有所减少，零件还要求其挤压部分的拔模斜度为零，并要求更小的公差。

在设计冲击挤压件时，必须考虑到以下因素：

- 多种多样的对称型材成为其可能。
- 壁厚的变化(薄侧壁和厚底，或厚侧壁和薄底)成为可能。

- 可以包含筋肋、凸缘、凸台和凹坑。
- 长度与直径之比的范围可以从1.5:1～15:1。其中比值从6:1至8:1可认为是很好的使用比值。
- 面积的收缩率大小依挤压的合金而定，并受制于所能使用的设备尺寸。断面收缩率达到95%的零件都能挤压制造。一般来说，合金M1A和AZ31B的挤压件壁厚可以做得比AZ61A、AZ80A和ZK60A的更薄。
- 冲击挤压件的某些部位可能有锐利的圆角半径。这对于其他的一些产品形式是不行的
- 冲击挤压件的平均性能比用于制造零件的热挤压毛坯的一般性能稍高一些。

锻件。如同其他的金属锻件一样，镁锻件也能按照各种形状和尺寸进行生产。其最大尺寸主要取决于所用设备的大小。其公差可控制在与其他金属一般锻件相同的数值里，并且按锻件的尺寸和设计而有所改变。

在各种镁制件的生产形式中镁锻件具有最佳的强度组合特征。它们应用于要求重量轻与刚性、高强度相结合的场合里。镁锻件的应用有时是由于其受压致密性、切削性及不易翘曲性得到青睐，而不是高强度重量比。

锻件适用于其产量足以分摊模具成本的零件，以及要求有高强度和塑性，和比采用铸件获得更好均质性和致密性的零件。对较小的产量可以采用手工锻造，但是模锻件具有更好的力学性能并能以较大的数量来减少费用。

镁的易加工性使得为生产成品零件所需要的锻压工序数大幅度减少。在锻压黄铜、青铜和钢中的许多一般所必需的工步(如冲孔、碾平、拉伸和烙平、整形和压型以及切边和辊轧)，在锻压镁中非属必要。在锻压镁中主要的工步是弯曲、下料和精整。

模具的设计及由此形成的金属流动会导致大型锻件在不同截面上拉伸性能的变化。图3.3-2所示是作为其例子的飞机上用镁合金锻压的轮子。试件取自合金AZ80A-T5和合金ZK60A的T5和T6状态的锻件上的若干部位。

利用分离铸造或锻压的试棒进行试验得到的镁合金的力学性能，作为一种比较来评价特定特性是十分有用的，而且能作为一种控制的方法加以利用。然而，这些试验结果会因为其试件取自生产铸件或锻件上不同部位而造成试件性能上相当大的差异。这种差异的程度是受截面厚度和金属流动方向的影响。

制造特性

成形性

像具有六方晶体结构的其他合金一样，镁合金在高温下加工比在室温里加工容易得多。于是镁合金通常在高温下成形，而冷成形只用于围绕大圆弧的轻度变形。镁合金成形所使用的方法和设备与其他金属的合金成形所使用的是一样的，除在高温下进行成形要求使用的工装和技术不同外。

高温下的金属加工比其冷加工有多个优点。镁的零件通常在高温下一次拉制而成而不用反复的退火和拉制，故而减少制造零件的时间并节省在增加的步骤中需要添置的设备。对于大多数的成形来说，都不必使用淬硬的模具。热成形的零件的尺寸精度比冷成形的更高，因为其回弹性较小。表3.3-12针对不同锻压镁合金给出建议的最高成形温度和最长时间。

表3.3-12　锻压镁合金的最高成形温度和最长时间

合金	温度		时间①
	℃	℉	
薄板			
AZ31B-O	288	550	1h
AZ31B-H24	163	325	1h
HK31A-H24	343	650	15min
	371	700	5min
	399	750	3min
挤压件			
AZ61A-F	288	550	1h
AZ31B-F	288	550	1h
M1A-F	371	700	1h
AZ80A-F	288	550	0.5h
AZ80A-T5	193	380	1h
ZK60A-F	288	550	0.5h
ZK60A-T5	204	400	0.5h

①合金在该温度下不会给性能造成不利影响的最长时间。

可锻性

表3.3-13对四种镁合金的可锻性作出评价。可锻性是用横向塑性进行衡量的，假设其幅板的厚度约为3mm(⅛in)，最小的拔模斜度为1°。ZK60A合金表明具有比其他三种高强度的合金稍微更好的可锻性。

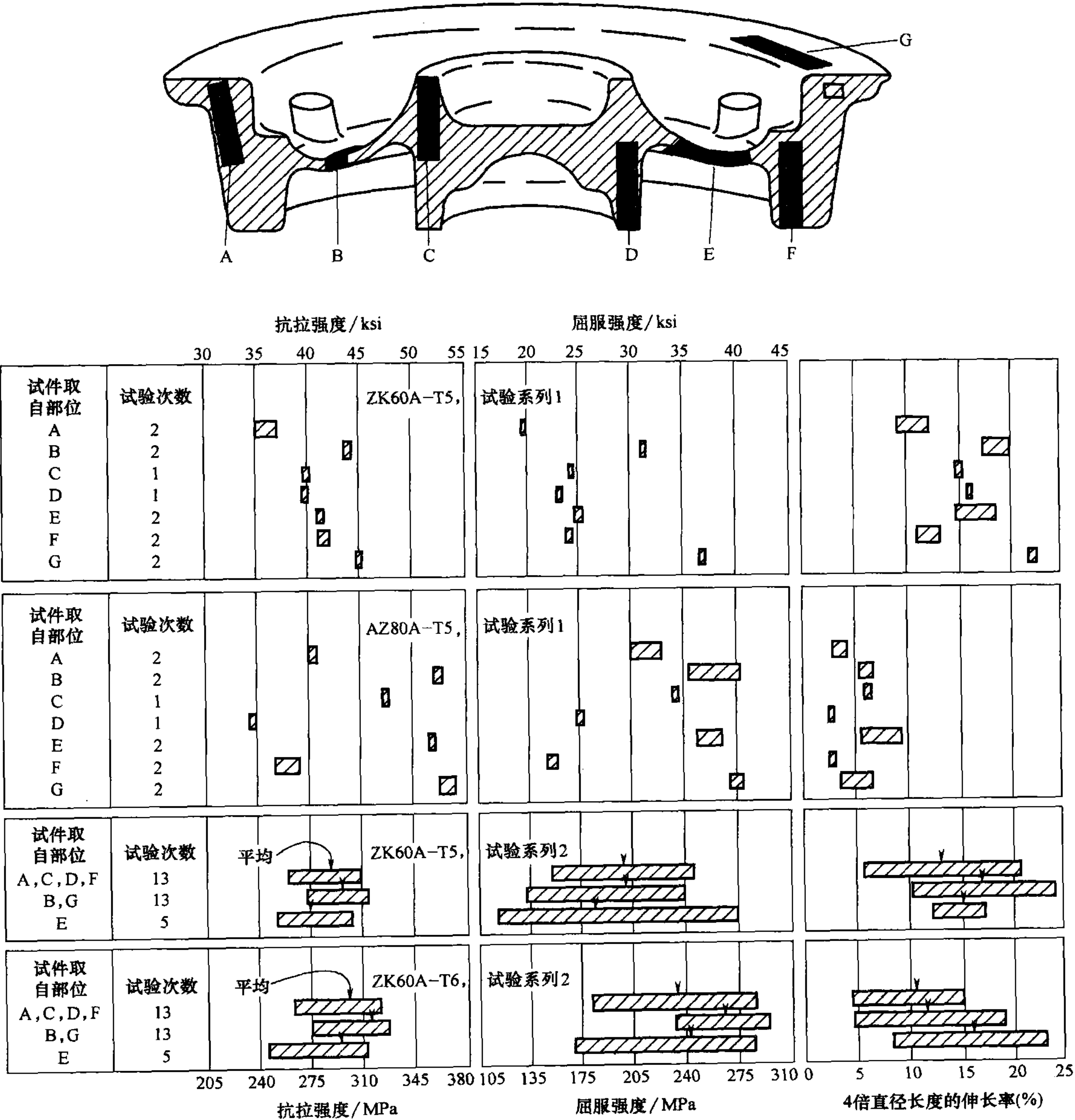


图3.3-2　合金、热处理和试件不同部位对飞机轮子所用的锻压镁合金的力学性能的影响

表3.3-13　四种镁合金的可锻性

合金	横向塑性①(%)	锻压特性	合金	横向塑性①(%)	锻压特性
ZK60A	7.0	特别适合于液压或机械压力机生产小型锻件，大型锻件限于用液压压力机加工。性能几乎等同于AZ80A	HK31A	5.0	如果保持适当的温度，易于锻压。推荐在高温中应用
AZ80A	5.0	锻件有最高强度。锻件限于用液压机压制	HM21A	5.0	轧环和模具锻件。推荐在高温中应用

①最小幅板的厚度为3mm(⅛in)，最小的拔模斜度为1°。

连接方法

焊接。镁合金采用气体保护金属极电弧焊和电阻点焊可容易地进行焊接。一般使用与基体金属成分近似相同的焊条能获得满意的效果。

对接焊和角焊对于镁是最适用的，因为它们最容易用电弧焊焊接，而且它们比其他形式的焊接更为坚固。有时也用搭接焊，一般在承载的应用上不如对接焊令人满意。

经退火的镁合金薄板和厚板的电弧焊接缝的室温抗拉强度比其基体金属低不到10%（接缝效率大于90%）。然而，硬轧材料的弧焊焊缝的抗拉强度由于其焊接的退火效果而显著低于其基体金属（接缝效率只有60%~85%）。因此镁合金薄板和厚板的电弧焊接缝在室温下的抗拉强度几乎都一样，而与基体金属的状态无关。至于用交流还是用直流焊接在性能上并无明显差别。

应力消除。某些镁合金——特别 Mg-Al-Zn 系列和含有 >1% Al 的合金——的电弧焊焊缝易于遭受应力腐蚀开裂，故必须用热处理去除会造成这种状况的残余应力。将零件置于夹具或压板中，然后加热到表3.3-14所列的温度保持规定的时间。加热后让其在静止空气中冷却。夹具的使用有时很有必要，可以避免因应力消除而导致焊合件的翘曲。

表3.3-14 镁合金电弧焊焊缝应力消除的时间和温度

合金	温度		时间/min	合金	温度		时间/min
	℃	℉			℃	℉	
薄板				**铸件**			
AZ31B-H24①	150	300	60	AM100A	260	500	60
AZ31B-O①	260	500	15	AZ63A	260	500	60
挤压件②				AZ81A	260	500	60
AZ31B-F①	260	500	15	AZ91C	260	500	60
AZ61A-F①	260	500	15	AZ92A	260	500	60
AZ80A-F①	260	500	15	EZ33A	250	480	600
AZ80A-T5①	204	400	60	HZ32A	350	660	120
HM31A-T5	425	800	60	ZFA1A	330	625	120
ZK60A-F③	260	500	15	ZH62A	330	625	120
ZK60A-T5③	150	300	60				

①为防止合金可能发生的应力腐蚀开裂，要求进行焊接后应力消除。其他合金的焊接后热处理主要用于切削加工前的调直或应力消除。 ②当挤压件要焊接到薄板上时，通过使用较低的应力消除温度和较长的时间，将扭曲变形降低到最低限度。如150℃(300℉)60min，或260℃(500℉)15min。 ③ZK60的可焊接性十分有限。

其他种类的镁合金包括含有锰、稀土、钍、锌或锆的合金，对于应力腐蚀并不敏感，故一般不要求进行焊接后的应力消除。

点焊。镁的点焊具有良好的静态强度，但其疲劳强度低于铆接或粘接的连接。点焊组合主要用于低应力用途，对承受震动的情况不予推荐使用。

线焊焊接。连续和间断型的线焊具有与点焊相当的强度性能。AZ31B的1.0~3.2mm(0.040~0.12in)厚薄板能够获得19.2~40.2kg/线长mm(1075~2250lb/线长in)的抗剪强度。

焊接成本。焊接成本随生产数量而明显变化的可能性比其他的生产方法小。因此，焊接件最经常用于小批量的生产或无法采用其他方法制造的一些特定设计的制造上。

粘接。镁的粘接已经成为一种重要的制造技术。粘接的搭接连接所具有的疲劳特性比其他各种连接的都要好。其应力集中失效的可能性是最小的。粘接能够连接比所能进行有效铆接的材料更薄的材料。粘结剂填满接触表面之间的空间，并在连接处的任何不同种类材料之间起到绝缘的作用。它还能使粘接的组件具有比采用铆接的更加平滑的接触表面。

粘接的应用几乎特别限于搭接。以下是在设计粘接的接头时，应该考虑的几个一般因素：

- 连接强度随搭接宽度、金属厚度、作用载荷的方向和所采用的粘结剂的种类而变；
- 接头的设计应保证它有足够大的粘接面积；

- 粘接层应当有均匀一致的厚度；
- 粘接层应当尽量的薄，还要有充足的使用量，确保粘接没有“空缺”；
- 其接头的设计还要保证容易加压和加热；
- 普通结构粘结剂的处理温度低于影响硬轧镁薄板性能的温度，因此它们不会显著降低退火状态(0)镁合金的性能。

铆接。在铆接其他材料所用的基本步骤也可应用于镁合金的铆接。对于钻孔和锪锥形沉孔的情况，都采用标准化步骤。在埋头铆接中进行机动锪锥孔和凹陷铆。采用机械锪锥孔时，在孔底部分至少应留有深度为0.38mm(0.015in)的圆柱面。这样机动锪锥孔被限制在有足够厚度的薄板里，使此深度的圆柱面具有给定的铆接尺寸。镁合金薄板的凹陷铆是一种热成形的工序，为防止在凹陷铆的过程中造成性能的降低，薄板不得加热到过高的温度或长的时间。

只有要将电镀的不相容性减小到最低限度才应该用铝铆钉，而且直径8mm(5/16in)以下的铆钉可以进行冷铆。合金5056铆钉的铆接容易程度随其状态而异。作为正常铆接，四分之一的硬度状态(5056-H32)可以取得令人满意的效果，尽管6053-T61和6061-T6有时也能代而用之。

切削性

镁和镁合金在切削中能用极高的切削速度，和使用比其他结构材料更大的切削深度(背吃刀量)和更高的进给速度。各种镁合金的切削性并没有明显的差别。因此，只是由于切削性的原因选用一种镁合金来代替另一种镁合金的这种情况，即使有也是很罕见的。

由于镁合金的易切削特性，在切削过程中能很好地进行断屑。采用标准规范能达到的尺寸误差约为±0.1mm(千分之几英寸)。

切除一定量金属的功率消耗，作为镁所消耗的低于其他普通金属切削所消耗的。下面列表对不同金属所需要的功率消耗按照每分钟切除的金属体积进行比较。

金　属	相对功率消耗
镁合金	1.0
铝合金	1.8
黄铜	2.3
铸铁	3.5
低碳钢	6.3
镍钢	10

镁合金极佳的切削特性也成就了它们具有获得极好的加工表面粗糙度的能力。通常，不必进行磨削和抛光便能得到光滑的表面。镁经过切削的表面粗糙度读数为~0.1μm(3~5μin)已见诸报告，而且其切削速度可高或低，切削液也可用或不用。

切削液(“冷却剂”)。在镁合金的切削过程中，切削液能减少的摩擦远少于切削其他金属所减少的摩擦，因此对于降低表面粗糙度和延长刀具寿命的用处也不大。切削液有时用于冷却工件，但至今大多数的镁都是进行干切削。然而切削液能抑制氢气的形成，故而现在也有使用并正在为较湿态的切削应用开创先河，特别是在大批量的汽车应用上。

虽然切削镁合金产生的热量比其他金属少，但由于较高的切削速度、镁的低热容量以及镁的相对较高热膨胀特点，还是有必要使产生的少量热量得以散发。借助于正确的刀具和切削技术可以使热量的产生降到最低限度，但有时需要用切削液来减少可能产生的工件变形和细切屑的点燃。因为它们主要是用于散发热量，所以用于镁合金切削中的切削液也称为“冷却剂”。

许多粘度相对较低的矿物油切削液都能作为冷却剂满足切削镁的使用。适用的冷却剂代表了在冷却性和闪点之间的折中。旨在提高湿润性的添加剂通常也是有益的。只有矿物油可作为冷却剂使用，而动物油和植物油都不推荐使用。

水溶性油、油/水乳化液或任何水溶液都不应用于镁。水会降低镁车屑的废料价值，还会造成金工工车间的废料在储运过程中酿成火患。

安全措施。当进行镁的切削时，必须考虑到切屑或车屑会引起火灾。它的切屑要加热到接近熔点才会被点燃。在切削过程中，粗加工和半精加工产生的切屑太大而不容易点燃。然而，精细切削产生的细切屑就会被火星点燃。刀头在退刀前停止进给并继续压工件上，以至刀头或刀夹在工件上磨蹭，于是会产生极细的切屑，所以要防止这样的情况发生。

使切屑点燃的可能性增加的因素有：①极小的进给量；②刀尖钝化或生成积屑瘤；③刀具设计不合理；④切削工艺不合适；⑤刀具撞上铁或钢的卡盘而产生火花。进给量<0.02mm(0.001in)/r和切削速度高于5m/s(1000ft/min)会增加起火的风险。甚至在最为不利的条件下——钝化的刀具和小的进给量——，只要切削速度低于3.5m/s(700ft/min)，切屑起火的可能性就都非常小。

变形。在切削过程中，镁的零件偶尔也会发生变形，通常因为过热或不正确的装卡或夹紧所致。

设计和减轻重量

许多零件通过将较重的金属如钢和铝合金用镁合金代替都能大大降低重量而不必重新设计或只需作很

少的更改。可能是由于制造上的局限性使零件超过其必要的重量。例如一个铸件为了浇铸满铸型而要求其最小壁厚大于由其使用所需要和所用金属强度所确定的壁厚。同样锻件和挤压件有时也要用超过其必要的厚度，将重量轻的镁用于这种类型的产品也是有好处的。在许多情况里，用镁代替重金属的铸件、锻件和挤压件能有合适的强度而不必增加壁厚。

对于另外一些零件，用镁替代也会要求用较厚的壁厚，则有必要进行较大的再设计，以此最大限度地节省重量。因为许多结构截面在弯曲上的强度和刚度分别近似地与其截面厚度的平方和立方成正比，因此通过适当增加厚度和横截面面积就有可能大幅度地提高其强度和刚度。若这样增加厚度是允许的，则对镁零件进行再设计通常也是经济的。较大体积的零件经过再设计可以降低其局部不稳定性，尽管所减少的重量还未达到最大值，但不稳定性的降低能使设计得以简化并降低制造成本。

表 3. 3-15 将镁合金在室温下的厚度、相对抗弯强度(定义为屈服强度和截面模量的乘积)、刚度和重量与铝合金和钢的进行了比较。

表 3. 3-15　所选结构金属的相对抗弯强度、刚度及重量

材　料	厚度	相对抗弯强度	刚度	重量
厚度相等				
1025 钢	100	100.0	100.0	100.0
6061-T6 铝薄板和挤压件	100	97.2	34.5	34.5
AZ31B 镁挤压件	100	47.2	22.4	22.5
ZK60A-T5 镁挤压件	100	88.9	22.4	22.5
AZ31B-H24 镁薄板	100	73.4	22.4	22.5
抗弯强度相等				
1025 钢	100	100	100.0	100.0
6061-T6 铝薄板和挤压件	101	100	35.8	34.8
AZ31B 镁挤压件	146	100	69.2	32.9
ZK60A-T5 镁挤压件	106	100	26.7	23.9
AZ31B-H24 镁薄板	117	100	35.6	26.3
刚度相等				
1025 钢	100	100	100	100.0
6061-T6 铝薄板和挤压件	143	199	100	49.2
AZ31B 镁挤压件	165	129	100	37.2
ZK60A-T5 镁挤压件	165	242	100	37.2
AZ31B-H24 镁薄板	165	200	100	37.2
重量相等				
1025 钢	100	100	100	100
6061-T6 铝薄板和挤压件	290	817	841	100
AZ31B 镁挤压件	444	930	1962	100
ZK60A-T5 镁挤压件	444	1753	1962	100
AZ31B-H24 镁薄板	444	1451	1962	100

注：在室温下比较宽度相等的矩形梁，他们的最小屈服强度如下：1025 钢，250MPa(36ksi)；6061-T6 铝，250MPa(35ksi)；镁合金，最小拉伸屈服强度和压缩屈服强度的平均值。

所有的比较均以百分数表示。

精选参考文献

- M. Avedesian and H. Baker, Ed., *ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM International, to be published in 1999.
- C.R. Brooks, Magnesium-Base Alloys, *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, American Society for Metals, 1982, p 253–274.
- R.S. Busk, *Magnesium Products Design*, Vol 1, Marcel Dekker, 1987.
- E.F. Emley, *Principles of Magnesium Technology*, Pergamon Press, 1966.
- P.A. Fisher, Production, Properties, and Industrial Use of Magnesium and Its Alloys, *Int. Met. Rev.*, Vol 23 (No. 6), 1978, p 269.
- T.E. Leontis, Magnesium: Alloying, Fabrication, and Selection, *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*, M.B. Bever, Ed., Pergamon Press and MIT Press, 1986, p 2624–2632.
- L.F. Lockwood, G. Ansel, and P.O. Haddad, Magnesium and Magnesium Alloys, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd ed., Wiley-Interscience, New York, 1981, p 570–615.
- L.M. Pidgeon, Magnesium Production, *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*, M.B. Bever, Ed., Pergamon Press and MIT Press, 1986, p 2635–2638.
- I.J. Polmear, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 3rd ed., Halsted Press, 1995, p 204.
- G.V. Raynor, *The Physical Metallurgy of Magnesium and Its Alloys*, Pergamon Press, 1959.
- C.S. Roberts, *Magnesium and Its Alloys*, John Wiley & Sons, 1960.

第2节　耐腐蚀性

镁或镁合金的耐腐蚀性取决于许多对于其他金属同样关键的因素。然而由于镁的电化学活性（表3.3-16），某些因素的相对重要性大大增加了。下面将讨论重金属杂质、环境类型（乡村空气、海洋空气、高温等）、零件的表面状态（如铸造态、经处理和油漆）和装配方法的影响。在某些环境中，镁零件如没有通过适当的设计或表面保护来防止电偶合的形成就会使其遭受严重损害。因此有关这方面内容将在本节的“电化学腐蚀”中详细讨论。

表3.3-16　标准还原电位

电　极	反　应	电位/V
Li, Li^+	$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	-3.02
K, K^+	$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2.92
Na, Na^+	$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2.71
Mg, Mg^{2+}	$Mg^{2+} + e^- \rightarrow Mg$	-2.37
Al, Al^{3+}	$Al^{3+} + e^- \rightarrow Al$	-1.71
Zn, Zn^{2+}	$Zn^{2+} + e^- \rightarrow Zn$	-0.76
Fe, Fe^{2+}	$Fe^{2+} + e^- \rightarrow Fe$	-0.44
Cd, Cd^{2+}	$Cd^{2+} + e^- \rightarrow Cd$	-0.40
Ni, Ni^{2+}	$Ni^{2+} + e^- \rightarrow Ni$	-0.24
Sn, Sn^{2+}	$Sn^{2+} + e^- \rightarrow Sn$	-0.14
Cu, Cu^{2+}	$Cu^{2+} + e^- \rightarrow Cu$	0.34
Ag, Ag^+	$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	0.80

未合金化的镁在结构用途中应用并不广泛。所以通常需要关注的是镁合金的耐腐蚀性。正确制造和使用的镁合金都是能耐腐蚀的，并且成功地在民用、工业和航空的各种用途中得到广泛的应用。而腐蚀通常都是由于不合适的设计或应用、或不适当的保护性抛光所造成的。

冶金学因素

化学成分。图3.3-3表示14种元素在二元合金镁合金中各自单独增加时对盐水腐蚀性产生的影响。已经知道，图3.3-3中的6种元素（铝、锰、钠、硅、锡和铅）加上钍、锆、铍、铈、镨和钇，当超过其固溶度或作为最高含量的5%加入时，即使会对纯镁在碱性盐水里的耐腐蚀性造成什么不利影响也是极小的。图3.3-3中的4种元素（镉、锌、钙和银）对腐蚀速率会有轻微到中等程度的加速效应；而另外4种元素（铁、镍、铜和钴）却有极其有害的影响，这是因为其低固溶度极限以及它们作为活性的阴极位置具有在水的还原过程中消耗（牺牲）镁元素的能力。虽然钴很少达到有害的含量程度，甚至通过让钴钢长久地浸没在熔化的镁中都无法使钴溶入镁里，然而铁、镍和铜都属于一般易于因不良的金属熔炼工艺而混入的杂质。这些元素必须控制在各自的溶解度的限度以内（或通过使用如锰或锌的一些合金元素来抑制它们的活性），以此得到良好的耐腐蚀性。

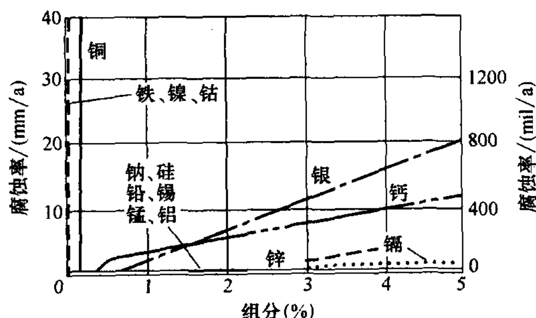


图3.3-3　合金化和杂质金属对镁的腐蚀速率的影响，通过轮换浸没于3%的NaCl溶液进行测定

图3.3-4显示压铸AZ91试件中铁、镍和铜杂质的增加对由标准ASTM规定的盐雾性的影响，并将其与冷轧钢和压铸铝合金的380件样件的试验所得性能范围进行了比较。由上述结果导出以低压和高压两种方式铸造的镁铝合金中主要杂质极限定义值，并引出其经改进的高纯度型合金的概念。表3.3-17列出所规定的一些主要杂质极限值。镁铝合金中铁

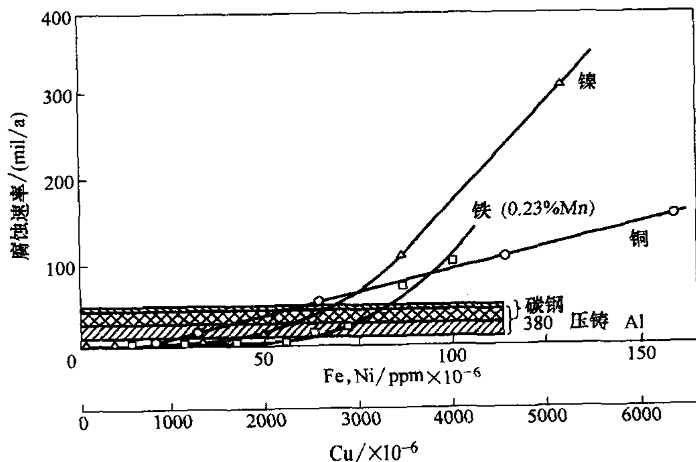


图3.3-4　铁、镍和铜杂质的含量对按标准ASTM B 117规定的盐雾腐蚀速率的影响。AZ91镁合金对照冷轧钢和380压铸铝

的允许含量取决于锰的存在，这是多年前有人提出，但是直到最近才得以证明的事实。对于含有0.15%锰的AZ91，这意味着铁的允许含量为0.0048%(0.032×0.15%)。所以AZ91的较高纯度型如AZ91D(最高0.001% Fe，最高0.001% Ni、最高0.015% Cu和最低0.17% Mn)是为了用于要求有强耐腐蚀性的压铸件。

还应指出的是，镍的允许含量主要取决于会影响晶粒大小的铸造方式，低压铸造合金在铸造状态(F)下的允许镍含量只有10ppm。因此用于低压铸造用途的合金应尽可能地降低镍的含量。与AZ91合金相比，合金AM60所允许的杂质低极限值会与锌的缺失有关。锌被认为能提高镁-铝合金中对于上述三种杂质的允许含量，但是由于对微缩疏松度的不利影响和对腐蚀的加速影响，它也被限制在1%~3%。

表3.3-17　已知的高和低压铸造类型中的杂质允许极限值

合金类型	晶粒大小/μm	临界杂质极限值(%)		
		Fe	Ni	Cu
未合金化的镁	—	0.015	0.0005	0.1
AZ91/高压铸造	5~10	0.032Mn①	0.0050	0.040
AZ91/低压铸造	100~200	0.032Mn①	0.0010	0.040
AM60/高压铸造	5~10	0.021Mn②	0.0030	0.010
AM60/低压铸造	100~200	0.021Mn②	0.0010	0.010
AZ63/低压铸造	—	0.003③	0.0040	>0.45
K1A/低压铸造	—	>0.003	0.003	—

①铁的允许值等于合金含锰量乘以0.032。　②铁的允许值等于合金含锰量乘以0.021。　③AZ63的镁含量(原为如此,应为锰含量之误——译者注)，据报告为0.2%。

当与高纯度的镁-铝合金比较时，含有锆的稀土、钍和锌合金的一般耐盐水腐蚀性虽有适度的降低——前者为0.5~0.76mm/a(20~30mil/a)，后者与之对照为在5%的盐雾中不到0.25mm/a(10mil/a)——但杂质必须再次予以控制。在这种情况里锆合金元素是很有效的，因为它对镁合金起到一种强烈的晶粒细化剂作用，并且它能在铸造之前使铁杂质从合金中析出。然而如果使用含超过0.5%~0.7% Ag或超过2.7%~3% Zn的合金，应该预期其耐腐蚀性会有所降低(见图3.3-3)。不管怎样，这些合金当有适当的精加工时，就能在严酷的环境中得到极好的应用。

热处理和冷变形加工。对于纯度可控的含0~1% Zn的Mg-Al-Mn合金，只要热处理材料在空气中从固溶处理的温度冷却下来，在仅经过变形加工的材料与经过固溶处理并时效的材料之间即使存在腐蚀速率上的差异也是微不足道的。通过类似的冷却，状态为固溶处理或固溶处理并时效的含有2%~3% Zn的纯度可控合金的腐蚀速率要稍高于其铸造状态。在含铁量超过允许极限值的合金里，固溶处理将使腐蚀速率提高到二至五倍。如果固溶后马上进行时效，则这个倍数会减小。

热处理对于在3% NaCl中的腐蚀速率所造成的影响特别明显地接近于含铝和锌的合金上的焊缝(在快速冷却的热效应区会发生严重的侵蚀)。

镁合金的冷变形加工，如延伸或弯曲都不会对腐蚀速率产生明显的影响。腐蚀速率会因钢珠或石英砂的喷丸处理而增加，是因为其表面受到沾污。通常应用酸洗到深度0.01~0.05mm(0.0004~0.002in)以去除有腐蚀活性的杂质，但是酸洗有可能使杂质再次沉淀。因此，当这种杂质必须去除时，可以改用氟化物的阳极化作用。

环境因素

大气。一种干净的、未经保护的镁合金处于室内外不含盐雾的大气中会形成一层灰色薄膜，由其保护金属免遭腐蚀，而因此力学性能的损失则微不足道。材料的处置设备就是一个粗加工镁的成功应用例子。附于表面的氯化物、硫酸盐和含有潮气的外来物质都会促使腐蚀和点蚀的发生，除非金属采用适当的涂层保护。

暴露在大气中普通形成的镁合金表面膜并不能保护金属免遭进一步的侵蚀。不过，如果这层膜致密且粘结得好，它就能降低进一步侵蚀的速率。未经保护的镁和镁合金零件具有在乡村大气中的耐腐蚀性，以及在工业大气和轻度海洋大气中的中等耐腐蚀性，只要这些零件没有会潴留水分的接头和凹口，就不能与不同类的金属相接触。镁合金一般会在工业大气和轻度海洋大气中降低强度，而不论其是否处于承受应力或不承受应力的情况里。然而除了密切暴露于海水以外，其在大气里暴露期间任何饱含水分的导电性都是很低的，因此其腐蚀率也很低，并几乎不受合金成分和杂质的影响。

镁合金的腐蚀还随相对湿度的提高而增加。无论纯镁还是任何镁合金，在9.5%的湿度里经历18个月都不会发现表面腐蚀的迹象。在30%的湿度里会显示少量非晶相和轻微腐蚀的迹象。在80%的湿度里超过~30%的表面上存在非晶相，并显示出相当程度的腐蚀。只有当相对湿度达到93%或以上时，才会形成晶体氢氧化镁。

镁合金在海洋大气的重度盐雾中的长期保存需要进行保护。镁合金的耐大气腐蚀性不如铝合金但是比低碳钢要强得多了。表3.3-18以在三种不同的合金在大气里，按照重量的减小、强度的降低对一种镁合金、一种铝合金以及一种低碳钢进行比较。所有的金属表面都不加保护。

表3.3-18　一种镁合金、一种铝合金以及一种低碳钢在大气里暴露2年半的结果

合　金	腐蚀速率		抗拉强度的改变(%)
	μm/a	mil/a	
海洋大气①			
铝，2024-T3	2	0.06	2.5
镁，AZ31B-H24	18	0.70	7.4
低碳钢(0.27% Cu)	150	5.91	75.4
工业大气②			
铝，2024-T3	2	0.08	1.5
镁，AZ31B-H24	27.7	1.09	11.2
低碳钢(0.27% Cu)	25.4	1.00	11.9
乡村大气③			
铝，2024-T3	0.1	0.005	0.4
镁，AZ31B-H24	13	0.53	5.9
低碳钢(0.27% Cu)	15	0.59	7.5

①在北卡罗来纳州的Kure海滩。　②在伊利诺伊州的Madison。　③靠近密歇根的midland。

淡水。镁合金在室温下的静止蒸馏水里能迅速形成保护膜，以防止进一步被腐蚀。水里溶解少量的盐特别是氯化物或重金属盐会造成保护膜的局部破坏，通常就此形成点蚀。

无论在淡水还是盐溶液里，溶解氧都不会对镁的腐蚀起主要作用。然而搅拌、或任何破坏或妨碍保护膜形成的做法都会导致腐蚀。当将镁浸没在少量的静止水里时，其腐蚀的速率都是微不足道的。当不断地补充水使得氢氧化镁($Mg(OH)_2$)的溶解度总也达不到其极限值时，腐蚀的速率会提高。

镁合金在纯水里的腐蚀随温度的升高而明显增加。AZ合金在100℃(212℉)里的腐蚀率一般为0.25～0.50mm/a(10～20mil/a)。纯镁和合金ZK60A会在100℃(212℉)里发生严重腐蚀，速率达到25mm/a(1000mil/a)。当到150℃(302℉)时，所有的合金都会被严重腐蚀。

盐溶液。在中性重金属如铜、铁和镍的盐溶液中，会发生严重的腐蚀。当重金属、碱性重金属盐或两者一起沉积出来并在阳极镁表面上形成活性阴极时，就会发生这种腐蚀。

氯化物溶液是有腐蚀性的，这因为即使很少含量的氯化物，通常也会破坏镁表面的保护膜。氟化物会形成不溶解的氟化镁，从而不会有明显的腐蚀性。氧化盐特别是含有氯或硫原子的盐比非氧化盐更具腐蚀性，但是铬酸盐、钒酸盐、磷酸盐和许多其他的盐都能形成遏制腐蚀的膜，除非在高温中。

酸和碱。镁能被除了氢氟酸(HF)和铬酸(H_2CrO_4)外的所有无机酸快速腐蚀。镁不会被氢氟酸腐蚀到可以觉察的程度，因为它会在镁表面形成一种不溶解的氟化镁保护膜，然而在低浓度酸里会发生点蚀。在液相线上侵蚀的速率随着温度的升高而增加，而别处只增加到微不足道的程度。

纯H_2CrO_4以非常低的速率腐蚀镁和镁合金。而酸中所含的微量氯化物离子将明显增加这个速度。沸腾的20% H_2CrO_4水溶液广泛用于去除镁合金上的腐蚀物而不会侵蚀基体金属。镁能耐稀碱的腐蚀，10%苛性碱溶液一般用于在高达沸点的温度下清洗。

有机化合物。链(脂族)烃和芳香烃、酮、醚、乙二醇和高醇对镁和镁合金都没有腐蚀性。乙醇会造成轻微的侵蚀，而无水甲醇会造成严重的侵蚀。后者的侵蚀速率因水的存在而减弱。水含量等于或超出甲醇含量的～0.25%(质量分数)的汽油-甲醇调和燃料将不会腐蚀镁。

纯卤代有机化合物在常温下不腐蚀镁。但在高温或有水存在时这种化合物会造成严重的腐蚀，尤其是那些含有酸性终端产品的化合物。

干的氟化烃类如氟利昂深冷剂在室温通常不侵蚀镁合金，但若有水的存在会造成明显的侵蚀。在高温下氟化烃类会与镁合金发生剧烈的反应。

在酸性食物里，像果汁和碳酸饮料，对镁的侵蚀虽说缓慢但还是能测量到的。牛奶会引起腐蚀尤其是变馊了时。

在室温里，乙二醇溶液对于单独使用或与钢非自然地连接的镁所产生的腐蚀是微不足道的。在如115℃(240℉)的高温下腐蚀的速率增加，除非添加适当的抑制剂。应当采取措施控制电流引起的腐蚀。

气体。在室温或稍高的温度下，干燥的氯、碘、溴和氟对镁有极少或没有腐蚀性。甚至含有0.02% H_2O 的干溴在其沸点(58℃或136℉)温度下所造成的腐蚀也不会比在室温下多。少量水的存在会导致氯的显著腐蚀，碘和溴会有一些腐蚀，但氟的腐蚀微不足道。在低于任何水相露点的湿氯、碘和溴都会给镁造成严重的腐蚀。在常温下干的二氧化硫气体不会造成任何腐蚀。如果有水蒸气存在就会发生一些腐蚀。湿的(低于露点)二氧化硫气体由于亚硫酸和硫酸的形成会对镁产生严重的腐蚀性。氨无论干或湿在常温下都不会造成腐蚀。干的二氧化硫(SO_2)气体或氨气在常温下也不会造成腐蚀，但若有水蒸气存在就会产生一些腐蚀。

空气或氧气中的水蒸气当温度高于100℃(212℉)时，会急剧增加镁和镁合金的氧化速率，而三氟化硼(BF_3)、SO_2和六氟化硫(SF_6)都能有效地降低氧化速率。在常态大气中存在的 BF_3和 SF_6能在高达并包括通常会导致合金点燃的温度下，有效地抑制高温氧化。

镁在氧气中的氧化速率随温度的升高而增加。在高温下(接近熔点)氧化速率是时间的线性函数。金属中的铈、镧、钙和铍能将氧化速率降低到低于纯镁的氧化速率。添加铍对于在温度高达熔点并延续相当长的时期里保护某些合金具有最为突出的效果。镁合金在高温中的结构应用通常受蠕变强度而不是氧化的制约。

土壤。镁合金在粘土和无盐砂质土壤中除了作为电镀阳极用以外，还具有良好的耐腐蚀性，但在含盐砂质土壤中的耐腐蚀性很差。

应力腐蚀开裂

含量超过~1.5% Al 的镁合金会对应力腐蚀开裂(SCC)产生敏感并随含铝量增加而可能增强。锻压合金看来比铸件的更为敏感。造成裂纹的应力源很可能在于焊接件的夹入处。这种合金的焊接结构件要求进行应力消除的退火。然而有关铸件在使用中因 SCC 而失效在文献中很少有记载，在实验室里将镁铸件置于几乎只会造成微不足道的一般性腐蚀的环境中进行试验，其受到的拉伸载荷才低至其屈服强度的50%就发现有损坏。铸件在使用中因 SCC 而失效的低发生率可以归因于实际所作用的低应力或者当施加一个不变的挠度时因屈服或蠕变而引起应力松弛。

电化学腐蚀

对电化学腐蚀的忽视已经成为镁合金扩大在结构用途中应用的主要障碍之一。严重的电化学问题主要产生于湿的含盐环境中，其原因前面已阐述过。

通过对主要杂质如镍、铁和铜以及对铁-锰之比进行严格的限制可以减少其内腐蚀电流，借助于此已经在提高镁合金的一般性耐盐水腐蚀方面取得显著的进展。这种进展对于电化学腐蚀并没有明显的影响，因为此时造成腐蚀的电动势(emf)是来源于外部即接合于镁的不同种类金属。因此，防止电损伤需要考虑的综合措施包括：

- 设计时要防止盐水接近和进入不同种类金属的接合处。
- 选用最能相容的不同种类金属。
- 利用绝缘物在电路的金属部分形成高电阻，或者通过增加电解电流的必经之路的长度使电路的电解部分形成高电阻。
- 对整个组件采用保护涂层。

金属的相对兼容性。所有的结构金属相对于镁都是阴极(较为惰性的)(表3.3-16)。在一定的暴露条件下，镁加速腐蚀的程度部分地取决于两种金属在 emf 序中的相对位置，而更重要的是取决于当动电电流流过时，因极化作用而使电偶的有效电位降低得有多快。镁电偶处于盐水里的主要极化作用机制就是一种阻止氢气在阴极形成和释放的能力。因此具有较低的氢过电压的金属如镍、铁和铜会构成镁的有效阴极并由此造成严重的电化学腐蚀。能使活性电位与较高的氢过电压相结合的金属如铝、锌、镉和锡，尽管不能完全与镁兼容，但其腐蚀的危害性还是小了很多。

通过在美国北卡罗来纳州的 Kure 海滩上的试验采集数据，在试验中将不同种类的金属薄板固定在 AZ31B 和 AZ61A 的接板上。按照在24.4m 和244m (80ft 和800ft)的站点上所观察到的镁电化学损伤等级，将不同种类的金属分成五组。其评估汇总如下：

第一组(影响最小)

- 铝合金 5052
- 铝合金 5056
- 铝合金 6061

第二组

- 铝合金 6063
- 包覆铝合金 7075
- 铝合金 3003
- 铝合金 7075

第三组

- 包覆铝合金 2024
- 铝合金 2017

- 铝合金 2024
- 锌

第四组

- 镀锌钢
- 镀镉钢

第五组(影响最大)

- 低碳钢
- 不锈钢
- Monel 高强度耐腐蚀镍铜合金
- 钛
- 铅
- 铜
- 黄铜

阳极和阴极面积的影响。镁阳极和不同种类金属阴极的相对面积对所发生的腐蚀损伤有重要的影响。一个大的阴极面积接合一个小的镁面积将导致镁的快速穿透，因为在小的镁阳极上的动电电流密度是非常高，并且在氯化物溶液中的阳极极化作用是非常有限的。这就是解释了为什么当接合是暴露于含盐的环境中时，经涂漆的镁不应与活性的阴极金属接合在一起。在结合处的涂层上的一点微小的破裂，都会因在该点上极化作用的加剧而形成很高的动电电流密度。面积的这种负面影响还会在使用铝粉或锌粉的一些专用涂层的特性上反映出来。当金属颜料作为一种涂层用于拧在镁上的钢制螺钉上时，它具有非常大的有效表面积，由此产生的危害甚至超过裸露钢。如果金属颜料中含有杂质如铁，其电化作用就会进一步加速。

微量组分对含镁铝的相容性的影响。含有微小百分比的铜(7000 和 2000 系列和 380 压铸合金)的铝合金将会给在含盐的介质中的镁造成严重的电化学腐蚀。非常纯净的铝是十分兼容的，如同极化阴极一样地起作用，但是当铁含量超过 200ppm 时，阴极活性变得明显(显然是因为金属互化物 $FeAl_3$ 的去极化作用所致)，而且镁的电化学侵蚀随含铁量的增加而迅速增加。铁的这种作用又由于镁在合金中的存在而减弱(见图 3.3-5)。这与铝合金 5052、5056 和 6061 的相对可兼容性相符合。

铝的阴极腐蚀。判别铝与镁合金的兼容性是很复杂的，因为当镁在静止的 NaCl 溶液发生牺牲腐蚀时，铝遭受产生于阴极的强碱的侵蚀。这种侵蚀会破坏含有相当多铁杂质合金的兼容性，显然也是因其新裸露的活性部位与低过电压暴露在一起所造成的。鉴于这种作用，含有颇多含镁量的铝合金(5052 和 5056)也就更具耐腐蚀性，但也不尽然。如图 3.3-5 所示，含

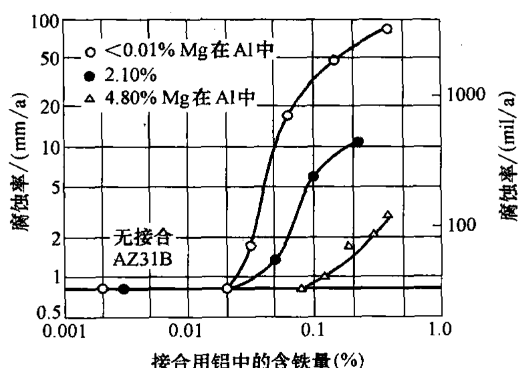


图 3.3-5　与含有不同铁和镁含量的铝相接合的镁合金 AZ31B 在 3% NaCl 溶液中的腐蚀率。所示无接合的 AZ31B 腐蚀率作为比较

有最高 200ppmFe 的 5052 合金或含有最高 1000ppmFe 的 5056 合金可以满足铝合金充分可兼容的基本要求。工业生产 5052 合金的技术指标允许有最高 0.45%(铁+硅)的含量，一般含有 0.3% Fe。在严酷的暴露中如 5% NaCl 的浸没中，上述含铁量再结合由镁引出的电流所造成的阴极腐蚀会使 5052 合金与镁不相兼容。然而，在大多数的实际情况里，这种极端状况并不存在；而且在一个镁的组装中，在电镀钢螺钉头下放置一个 5052 的垫圈将能减轻镁的电化学侵蚀。作为垫圈的最大效用，从螺钉沿铝的直线距离应当约为 4.8mm(3/16in)。

铝在海水里的阴极腐蚀远不如在 NaCl 溶液中严重，因为镁离子的减缓作用能降低 pH 平衡从 10.5 至大约 8.8。因此铝与镁的兼容性在海水里更好一些，并对铁含量的敏感性也小些。

涂层的阴极损伤。在阴极氢的逸出和强碱的生成都会损伤或破坏用于紧固件或接合在镁上其他附件上的有机涂层。故有必要使用耐碱树脂，但是涂层在严酷的工况如盐雾和盐浴中还是会很容易地被氢气从空隙和疏松处开始吹除。盐雾试验由于其严格性将导致某些紧固件的涂层试验的不合格，尽管它们在实际的使用环境中还是可以用的。仅采用盐雾来评价这些涂层，应该说不够可靠。

电镀钢的兼容性。与裸钢相比，钢的镀锌、镉或锡都能显著减少镁的电化学腐蚀。这与同电镀沉积物更兼容的电位和/或更高的氢过电压相一致。一般认为这三种电镀层的相对优势顺序(递减)为锡、镉和锌。

组合件的保护

与镁相接触的不同种类金属本身将不会造成电化

学腐蚀。作为其腐蚀的发生，两个表面还必须通过一个共用的电解液进行湿润。预防发生电化学腐蚀所应达到的程度取决于许多因素，其中运行环境是最重要的。

对于户内使用，因为不会发生冷凝故不需进行任何保护。甚至在户外有遮盖的环境里，镁零件也能有很好的使用寿命，只要还存在其他有利因素就不用特别措施预防电化学侵蚀。这些因素包括设计上的防水结构、良好的通风、器件加温或一种油膜的存在。

作为连续的户外使用，这时候镁组件会受潮或遭受到盐的溅射或喷洒，就必须采取预防电化学侵蚀的措施。虽然任何原因造成的腐蚀性侵蚀都会危及镁器件的正常工作，然而由电化学腐蚀所造成的损蚀也许是最有害的了。在腐蚀的条件下，使用高纯度的镁合金将不会在减小电化学腐蚀的影响方面取得明显效果。

镁-镁组合件。在所有实际用途中，镁合金之间的电化学腐蚀都是可以忽略不计的。然而，好的装配技术要求镁的接合表面都要有一层或多层铬酸盐颜料作为底层涂料。

镁-非金属组合件。虽然大多数的非金属材料如塑料和陶瓷与镁的连接都不会造成任何潜在的腐蚀危害，但是也有值得令人注意的例外。镁与木头的组合由于木头的吸水性而成为一个不寻常的问题，并且其组合有可能沥出天然酸。为了保护镁不受侵蚀，木头要先用油漆或清漆进行封闭，并且镁的接合面要用前述镁-镁组合件的方法进行处理。镁和碳纤维增强塑料的接合是又一个特例，当有共用的电解液存在时，就会造成镁的腐蚀，除非也采用类似的预防措施。

镁-不同种类金属组合件。可以采用多种技术使电化学腐蚀减小到最低限度或者使之不发生，如果不行就设法减小镁-不同种类金属耦合的影响。包括：

- 消除共用电解液；
- 减小所存在的不同种类金属的相关面积；
- 将不同种类金属的电位差降低至最低；
- 保护不同种类金属和镁不受共用电解液的作用。

为了减小电化学腐蚀引起的危害，好的设计能发挥关键的作用。通过预先搞一个简单的排泄孔或防止液体进入不同种类金属接头的屏蔽都是有可能消除共用电解液。要不然，安装螺钉或螺栓在凸台上位置也有助于避免共用电解液的接触，正如使用尼龙的垫圈、隔套或类似的防潮垫片。用固定端拧在盲孔内的双头螺柱代替单头螺栓将可减少所暴露的不同种类金属面积达50%。

与其他情况一样，因电化学腐蚀造成的侵蚀程度是与所用的金属间的电位差成正比。因此，可以通过慎重选择材料或选用与镁形成接触的镀层或涂层金属，以此将侵蚀程度减小到最低限度。

与镁相对兼容的不同种类金属为铝-镁（5000系列）或铝-镁-硅（6000系列）的铝合金，这些合金可以作为垫圈、垫隙片、紧固件（铆钉和专用螺钉）和结构件而使用。其他铝合金、钢、钛、铜、黄铜、Monel合金等，当在腐蚀的条件下与镁耦合在一起时将会使镁产生腐蚀，故需要进行保护。

铝、锌、镉和锡都可用于钢和黄铜零件的涂层，以减少与镁的电耦合。降低电位差或使用高氢过电压的材料作为镀层有助于减小在缓和腐蚀环境中的电化学腐蚀，但在严酷的腐蚀环境中效果甚微，为防止腐蚀应另加保护措施。

如前所述，使用湿润的组装技术将能消除裂隙中的电化学腐蚀。给金属接头填隙将可以通过延长电解路径来增加电耦合间的电阻，从而降低可能发生的侵蚀程度。聚氯乙烯绝缘带也可以用于将镁与不同种类金属或共用电解液隔离开来，以此防止电化学侵蚀的发生。最后，在组装之后对镁和更重要的是不同种类金属进行油漆，以使两种材料同任何共用电解液进行有效绝缘。

涂层保护系统

无机表面处理。在进行最后的油漆精加工之前可以对镁实施一种全范围的化学和电化学清洗以及表面预处理。不论采用何种预处理都必须对金属表面进行清洗。对于镁而言这就意味着除去油、灰尘或脂，并更重要的是除去其他表面杂质。因喷丸、清刷、滚筒清理、研磨以及其他打磨工序所遗留下来的重金属杂质的危害性特别大，还有像由模压成形润滑剂所含石墨造成的污染。使用与镁相兼容的打磨材料——如高纯度氧化铝、碳化硅和玻璃——都有助于保证所粘附的重金属为最少。

油、灰尘和脂可以利用传统的溶剂浸泡或使用氯化溶剂的蒸汽脱脂技术进行去除。也可以使用在高pH清洗剂中进行碱性清洗。氧化物、模压成形化合物以及其他表面杂质都可以用一些酸洗溶液去除。此外，所谓氟化物阳极化的电化学工艺对于去除砂子或重金属杂质也颇为有效。当尺寸不允许受影响时，这种工艺也能作为精加工应用。

镁的浸渍涂层或阳极涂层的主要功能是为了形成合适的表面，以便在后续涂敷有机涂层时促其粘附。

转化涂层按其功能不应认为是一种保护性处理，除非只是将它们暴露在无腐蚀的介质中。在这些条件下它们将延迟发生天然表面的氧化，并且使其获得看上去更加诱人的表面外观。

浸渍涂层（氧化铬酸洗液和重铬酸处理，如表3.3-19所示）是非常薄的涂层，主要用于储运时的保护和作为油漆之前的底漆用。这些涂层不应加热到高于260℃（500℉）。当使用氧化铬涂层而不用后续涂层时，必须慎重考虑，因为某些氧化铬涂层是会发生自燃的，即撞击会引发火星的。

表3.3-19 镁合金的化学转化涂层实例

名称	浸渍浴成分①	工艺规程	外观	典型的金属去除	备注
氧化铬酸洗（酸、铬酸盐）	180gNa_2-Cr_2O_7·$2H_2O$（重铬酸钠）、187mL70% HNO_3，加入到1L的H_2O里	室温中0.5~2min的浸没，使之沥干5~30s，在冷水中漂洗，热水助干	金黄，常带有虹晕色	高至0.015mm（0.0006in）	适用于所有的合金和产品类型，主要用于锻压件和压铸件，良好的油漆基体
重铬酸盐	50gNH_4F·HF或187mL 60% HF，加入到1L的H_2O里	室温中在活性剂中浸没5min，除AZ31合金外，AZ31合金如使用HF活性剂只能浸没½~1min，彻底漂洗	黄铜色至深褐色	忽略不计	适用于大部分合金和所有的产品类型，铸造后的压铸件表面应预酸洗以便去除表皮分凝，极佳的油漆基体
	180gNa_2-Cr_2O_7·$2H_2O$，2.5g CaF_2或MgF_2（氟化钙或氟化镁），加入到1L的H_2O里	在沸腾的溶液中浸没30min（最低95℃或205℉），保持pH4.0~5.5，漂洗并干燥			

①无论何时水都是规定使用去离子化水。

有多种硬阳极化处理方法可适用于镁，但是常用的处理为No.17和HAE处理（表3.3-20）。这两种处理都能用于薄（0.005mm或0.0002in）或厚（0.038mm或0.0015in）的涂膜，通过较厚的涂层处理可使其获得耐磨损和耐磨粒磨损的能力。由于这些涂层较为疏松，而为后续的涂层提供极佳的基体。然而特别对于较厚的涂膜，传统的油漆将无法完全封闭阳极疏松。为防止发生因一点损伤而导致亚表层腐蚀横向扩展的风险，故常采用树脂注入，以期在侵蚀性介质中获得最大耐用度。有时候也利用无机化学后处理将耐腐蚀剂对阳极涂膜进行注入，但是这些处理会对后续的有机涂层造成危害，还不如树脂注入那么有效。

表3.3-20 镁合金的两种硬阳极化处理的详细介绍

名称	浸渍浴成分①	阳极化条件			涂层外观	涂层的形成		备注
		时间/min	温度 ℃	温度 ℉		mm	in	
HAE	135~165g KOH，34g $Al(OH)_3$（氢氧化铝），34g KF（氟化钾），34g Na_3PO_4（磷酸三钾），20g K_2MnO_4（锰酸钾），加入到1L的H_2O里	薄涂层(70V)，8min 200A/m^2(0.13A/in^2)。厚涂层(90V)，60min 250A/m^2(0.16A/in^2)(ac阳极化)	15~30最高（要求冷却）	60~85最高（要求冷却）	浅褐色（薄）深褐色（厚）	0.005 0.040	0.0002 0.0016	适用于所有的合金和产品类型。薄涂层提供了极佳的油漆基体。厚涂层还提供极佳的耐磨损性，如果用有机树脂封闭还能得到超腐蚀保护。工艺具有良好的均镀能力

（续）

名称	浸渍浴成分[1]	阳极化条件			涂层外观	涂层的形成		备注
		时间/min	温度					
			℃	℉		mm	in	
No. 17	240g $NH_4F \cdot HF$, 100 g$Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$, 90mL 85% H_3PO_4，加入到1L的H_2O里	薄涂层(70V)，25min 200A/m²(0.13A/in²)。厚涂层(90V)，25min 200A/m²(0.13A/in²)(ac 阳极化)	70～80	160～175	浅绿色(薄) 深绿色(厚)	0.006 0.030	0.0002 0.0012	适用于所有的合金和产品类型。薄涂层提供了极佳的油漆基体。厚涂层提供良好的耐磨损性，如果用有机树脂封闭还能得到超腐蚀保护。工艺具有极佳的均镀能力

①无论何时，水都是规定使用的去离子化水。

精选参考文献

- M.R. Bothwell, *The Corrosion of Light Metals,* H. Godard, W.B. Jepson, and M.R. Bothwell, Ed., John Wiley & Sons, 1967, p 259–311.
- A. Froats, T.K. Aune, D. Hawke, W. Unsworth, and J.E. Hillis, Corrosion of Magnesium and Magnesium Alloys, *Corrosion,* Vol 13, *ASM Handbook,* ASM International, 1987, p 740–754.
- J.E. Hillis, Magnesium, *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation,* R. Baboian, Ed., ASTM, 1995, p 438–446.
- H.L. Logan, Magnesium Alloys, *The Stress Corrosion of Metals,* John Wiley & Sons, 1966, p 217–237.
- W.K. Miller, Stress-Corrosion Cracking of Magnesium Alloys, *Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation,* R.H. Jones, Ed., ASM International, 1992, p 251–263.

第4章　钛和钛合金

Rodney R. Boyer
波音民用飞机公司

有关钛和钛合金更详细的内容，读者可参阅由 ASM 国际部于 1994 年出版的《材料性能手册》钛合金和《ASM 手册》第 2 卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，586 ~ 660 页。其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

第1节　引论和概述

钛是一种低密度的元素（约为铁密度的 60%），它可以通过合金和变形工艺达到很高的强度。钛是非磁性的并有良好的热传导性。它的线膨胀系数低于钢的，而且还不到铝的一半。钛和钛合金的熔点高于钢，但作为结构用途，其最高的有用温度范围为 425 ~ 595℃（800 ~ 1100℉）。铝化钛合金有望在高达 760℃（1400℉）的温度下使用。钛还有钝化的能力，故表现出高度的耐大部分无机酸和氯化物侵蚀的能力。钛是无毒的并且具有一般的与人体组织和骨骼的生物相容性。各种不同钛合金能提供从非常低到高温下的高强度、刚度和韧性，低密度以及良好的耐腐蚀性的综合性能，从而使它们作为航空结构件和在其他高性能用途里减轻重量。钛及其合金所具有的优异的耐腐蚀性和生物相容性，再结合其不错的强度使之得以开拓在化工、石油化工、海洋环境和生物材料方面的应用。

由于其独特的性能，钛及其合金主要在两方面的应用领域里得到选用：耐腐蚀性的用途和高效强度结构件的用途。对于这两种不同领域的选择标准也是迥然不同的。耐腐蚀应用通常采用低强度的“非合金化”钛轧制品，用于制造储罐、换热器或反应釜，并应用于化工工艺流程、海水淡化或发电厂。与此相对的，一般的高性能用途必须使用高强度钛合金，为此有很大选择余地并取决于诸多因素，如热环境、加载参数、可选用的产品类型、制造特性以及检测和/或可靠性要求等。例如，强度较高的合金像 Ti-6Al-4V和 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 用于海上钻井和地热管线的用途。用于高性能用途的合金鉴于其用途的特殊性通常比用于耐腐蚀用途的“非合金化”钛要求更加复杂和成本低廉的加工。

钛合金长期以来一直代替铁或镍应用于航空用途，因为钛能为在从低温至中温中工作的高载荷零件减轻重量。许多钛合金用于加工成为在选定温度下具有最佳抗拉强度、抗压强度和/或蠕变强度，同时具有充分的可加工性，以便将其制成适合于特定用途的轧制品。在钛工业发展的历程中，各种不同成分组合都曾经历其短暂的应用，但是有一种合金，即 Ti-6Al-4V 始终在其工业用途中占据 45% 的份额。Ti-6Al-4V 在将其突出的性能与其特有的加工成形性（指能生产成所有类型的轧制品，而不论其尺寸大小）、良好的制造工艺性（指能将轧制品再制成复杂成品）以及具有可靠且经济的生产经验和市场可行性的结合方面是独一无二的。于是在为特定用途选择钛合金（或定制一种合金）时，Ti-6Al-4V 成为其他合金必须与之比较的标杆。Ti-6Al-4V 还是选择用于超强度铸件的标准合金。对高温用途，最常用的合金就是 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo + Si。这种合金主要用于涡轮机零件和以薄板的形式用于后燃烧室的构件及各种“热”飞机骨架的用途。

应用

结构钛合金的应用（后面将在“合金系统”的讨论中定义不同的合金分类）通常根据强度效率、疲劳强度、疲劳裂纹扩张速度和断裂韧度再加上对于制造如焊接和成形的要求考量来确定合金成分、组织（α、α-β或 β）、热处理（不同规范的退火抑或固溶处理和时效）以及选择和规定工艺规范等级的技术条件。钛通常被选择用于对铝来说温度太高而无法胜任的一些用途上，这时如果还得考虑其重量的因素，就不再根据温度/载荷使用钢或超耐热合金。在某些情况里，用耐腐蚀性而非强度或温度作为选用一种钛合金的主

要依据。

汽轮发动机机件。汽轮发动机的旋转机件要求使用钛合金，它们要有高温下的最高强度效率和冶金学稳定性。这些合金除其可预知的应力断裂和低循环周期疲劳特性之外，还必须有低蠕变速率。为了能再现地提供这些性能，严格规定的用户要求需确保控制均匀的显微组织和从总体上防止产生熔炼缺陷，如α偏析、密度高低错配的夹杂物以及未焊合的锭块疏松或缩管。目前，Ti-6Al-4V、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo、Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr和Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo都是一些用于汽轮发动机的合金。

航空压力容器。除了一些附加性能如焊接性和从低到适度高温下的可预知断裂韧度以外，它们同样要求最佳强度效率。为了达到这种性能上的结合，严格的用户技术指标会要求受控的显微组织和防止产生熔炼缺陷。对于低温用途要小心控制间隙元素如氧、氮和碳(趋低间隙,或ELI)，以此改进塑性和断裂韧度。基本的钛合金Ti-6Al-4V(或Ti-6Al-4V-ELI)无论是退火还是固溶处理和时效(STA)的状态都能广泛地应用于上述用途。Ti-5Al-2.5Sn-ELI也是其令人青睐的替代材料。

要求耐腐蚀和高强度的应用。飞机的结构应用以及高性能的汽车和船舰应用需要耐腐蚀性和高强度效率。后者通常借助合金的缜密选择并结合轧制工艺的严格控制来达到，而耐腐蚀性主要取决于成分。Ti-6Al-4V和Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo是目前用于高性能用途的两种合金。β钛合金广泛用于弹簧用途上。钛合金是一种理想的弹簧材料，这是由于它相对于钢的较低模量和较低密度。它能节省高达70%的重量和50%的体积减小。

钛合金已被应用于潜水艇外壳和海洋调查潜艇。由于其适用的传热性、热稳定性和耐腐蚀性，钛正被选用于发电厂的换热器。当选择钛用于高浓缩的核废料外层容器时，耐腐蚀性是其一个考虑因素。

决定是否将钛用于耐腐蚀的用途上通常也要从经济上考虑。钛的设备费用投资一般高于能与之竞争的材料，如不锈钢、黄铜、青铜、铜镍或碳钢。因此，钛的设备选用必须能形成较低的运行成本、较长的寿命或维护减少，以此证明从总体的寿命周期成本上看其选择是合理的。工业纯度的钛能满足耐腐蚀用途的基本要求。

光学系统的支承结构。这是钛的一个鲜为人知却又非常重要的结构用途。飞机、导弹的监控和导航系统常采用复杂铸件支承透镜，在其使用中会有很大的温度变化。在这种用途中，选用钛的主要理由是钛的线膨胀系数与光学系统最为匹配。

移植器官。由于其独特的耐腐蚀性，钛广泛应用于移植器官如人造心脏泵、心脏起搏器壳体、心脏阀瓣零件以及承载骨或臀关节的移植或正骨夹板(一般来说,人体体液是氯化物的盐水,其pH值介于从7.4至酸性的范围里,并还含有各种有机酸和其他组分——所有这些介质都不受钛的任何影响)。

消费性器件。这已经成为钛业市场里的另一个显要部分。高尔夫球击球手用的钛球杆头在该市场中占据了主要的份额。

物理冶金

钛大约在885℃(1625℉)的温度下要经受一次从致密六方(cph)晶体结构(α相)到体心立方(bcc)晶体结构(β相)的同素异构转变。转变温度(β转变——通过加热完成β的转变)极受下列元素的影响：提高转变温度的间隙元素氧、氮和碳(α稳定元素)，降低转变温度的氢(β稳定剂)，以及提高或降低转变温度的金属杂质或合金元素。

钛合金按其显微组织为以下四种当中的一种类型：α、接近-α、α-β或β。这种分类代表处理后的一般类型显微组织。大部分的α合金都会含有极少量的β相，作为一种工业纯的钛，有时这是由于散杂铁质的进入所致，并且有时由于加入微量的β稳定剂而提高其可加工性(例如将钼和钒加入Ti-8Al-1Mo-1V)。一种接近-α或超-α合金可以显示出与α合金相似的显微组织。而一种α-β合金是由α和残留的β或转变的β构成，而且工业型β合金从开始冷却到室温时往往都会保持β相，但是在热处理期间析出二次相。

合金元素的影响

上面已阐述过间隙元素氧、氮和碳的作用。替代式合金元素也能在控制显微组织和钛合金性能方面发挥重要的作用。

钽、钒、钼和铌都是与bcc的β相同晶型(即具有相似相结构)元素。钛并不与β同晶型的元素形成金属互化物。共析体系是钛与铬、铁、铜、镍、钯、钴、锰和某些其他过渡金属形成的。这些元素在α钛里的溶解度很低，并降低其转变温度。它们通常同一种或多种的β同晶型元素一起加入合金，用于稳定β相并防止金属间化合物的形成，而这些金属间化合物会在形变热处理、热处理或高温使用的过程中产生。

锆和铪与钛的α相和β相都能别具一格地成为

同晶型的。锡和铝在钛的 α 和 β 两种相都有显著的溶解度。铝能明显提高转变温度，而锡会使其稍有降低。铝、锡和锆通常都一起用于 α 和接近-α 合金中。在 α-β 合金中，这些元素在 α 和 β 相之间近似同等地分布。几乎所有的工业钛合金都含有这三种元素中的一种或一种以上的元素，因为它们在 α 和 β 相中都是可溶的，特别是因为它们能提高在 α 相中的蠕变强度。

能溶解于 β 钛中的元素比在 α 钛中的要多得多。添加时，应首先选 β 同晶型的合金元素，因为它们不会生成金属间化合物。然而铁、铬和别的化合物形成元素有时用于富 β 的 α-β 合金或 β 合金中，因为它们是强 β 稳定元素，并且改善其淬硬性和热处理的效果。镍、钼、钯和钌能提高非合金化钛在某些介质中的耐腐蚀性。

二次相和马氏体转变

金属间化合物和其他二次相都会在钛合金系统中形成。长期以来较为重要的相一直是 ω 和 α_2。ω 相尚未被证明是采用目前工艺方法所制造的工业系统中的一个组分。而 α-2(Ti_3Al) 已被认为是一些应力腐蚀开裂情形中的一个因素。对 α_2 的最新关注都集中于它在高温钛合金里出现并在基体中的应用。γ 金属间化合物合金(基于 TiAl 相)具有更高的温度特性，它们在空气涡轮发动机及其他高温零件的应用里受到高度的重视。有关钛铝金属间化合物合金的更多内容(见“先进钛合金”的讨论)将在后面介绍。

在 α-β 合金中，β 相一般通过马氏体的转变而发生分解。从 β 到马氏体的转变是在淬火和/或淬火并时效的过程中形成针状组织的缘由。钛合金的淬硬性一般指的是合金发生完全马氏体相的转变或在室温里保留 β 的能力。通过冷却产生 α′ 和 α″ 马氏体，并且在时效时分解成为 α 和 β 相。

合金系统

有多种牌号的非合金化钛。这些牌号间的主要差别在于氧和铁的含量。较高纯度的牌号(即较低的间隙原子含量)的强度、硬度和转变温度都低于间隙原子含量较高的牌号，并有较好的成形性。间隙元素氧和氮的高溶解度使得钛在金属中很独特，并且还发生对大多数的其他金属来说不会涉及的一些问题。例如，在空气中和高温下加热钛，不仅会造成氧化，还会由于氧气(和氮气)的向内部弥散而形成表面的固溶硬化。形成一个“α-表层”(或“空气掺杂层”)的表面硬化区。通常要在零件被使用之前通过切削加工、化学蚀刻或其他机械方法将这个表层去除，因为 α-表层的存在会降低疲劳强度和塑性。

表 3.4-1 所列的是目前可用的工业和半工业钛牌号及合金，它们又细分为四组：非合金化(工业纯)牌号、α 和接近-α 合金牌号、α-β 合金以及 β 合金牌号。

表 3.4-1 工业和半工业钛牌号及合金概括

代号	最小抗拉强度		最小 0.2% 条件屈服强度		最大不纯度极限(质量分数,%)					常规成分(质量分数,%)				
	MPa	ksi	MPa	ksi	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	其他
非合金化牌号														
ASTM 牌号 1	240	35	170	25	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	—	—	—	—	—
ASTM 牌号 2	340	50	280	40	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	—	—	—	—	—
ASTM 牌号 3	450	65	380	55	0.05	0.08	0.015	0.30	0.35	—	—	—	—	—
ASTM 牌号 4	550	80	480	70	0.05	0.08	0.015	0.50	0.40	—	—	—	—	—
ASTM 牌号 7	340	50	280	40	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	—	—	—	—	0.2Pd
ASTM 牌号 11	240	35	170	25	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	—	—	—	—	0.2Pd
α 和接近-α 合金														
Ti-0.3Mo-0.8Ni	480	70	380	55	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	—	—	—	0.3	0.8Ni
Ti-5Al-2.5Sn	790	115	760	110	0.05	0.08	0.02	0.50	0.20	5	2.5	—	—	—
Ti-5Al-2.5Sn-ELI	690	100	620	90	0.07	0.08	0.0125	0.25	0.12	5	2.5	—	—	—
Ti-8Al-1Mo-1V	900	130	830	120	0.05	0.08	0.015	0.30	0.12	8	—	—	1	1V

(续)

代号	最小抗拉强度		最小0.2%条件屈服强度		最大不纯度极限（质量分数,%）					常规成分（质量分数,%）				
	MPa	ksi	MPa	ksi	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	其他
α和接近-α合金														
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	130	830	120	0.05	0.05	0.0125	0.25	0.15	6	2	4	2	0.08Si
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	790	115	690	100	0.02	0.03	0.0125	0.12	0.10	6	—	—	1	2Nb，1Ta
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo	1000	145	900	130	0.04	0.04	0.008	0.12	0.17	2.25	11	5	1	0.2Si
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si	1030	149	910	132	0.03	0.08	0.006	0.05	0.15	5.8	4	3.5	0.5	0.7Nb，0.35Si
α-β合金														
Ti-6Al-4V①	900	130	830	120	0.05	0.10	0.0125	0.30	0.20	6	—	—	—	4V
Ti-6Al-4V-ELI①	830	120	760	110	0.05	0.08	0.0125	0.25	0.13	6	—	—	—	4V
Ti-6Al-6V-2Sn①	1030	150	970	140	0.04	0.05	0.015	1.0	0.20	6	2	—	—	0.75Cu，6V
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo②	1170	170	1100	160	0.04	0.04	0.0125	0.15	0.15	6	2	4	6	—
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr②	1125	163	1055	153	0.04	0.05	0.0125	0.30	0.13	5	2	2	4	4Cr
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr①	1030	150	970	140	0.03	0.05	0.0125	0.25	0.14	5.7	2	2	2	2Cr，0.25Si
Ti-3Al-2.5V③	620	90	520	75	0.015	0.05	0.015	0.30	0.12	3	—	—	—	2.5V
Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	1100	160	960	139	④	0.02	0.0125	0.20	④	4	2	—	4	0.5Si
β合金														
Ti-10V-2Fe-3Al	1170	170	1100	160	0.05	0.05	0.015	2.5	0.16	3	—	—	—	10V
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	900	130	830	120	0.03	0.05	0.020	0.25	0.12	3	—	4	4	6Cr，8V
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	1000②	145②	965②	140②	0.05	0.05	0.015	0.25	0.13	3	3	—	—	15V，3Cr
	1241⑤	180⑤	1172⑤	170⑤										
Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si	862	125	793	115	0.05	0.05	0.015	0.25	0.13	3	—	—	15	2.7Nb，0.2Si

①按退火条件给出力学性能，可以进行固溶处理和时效，以此提高强度。 ②按固溶处理和时效条件给出力学性能，合金一般不以退火状态使用。 ③主要为管材合金，可以进行冷拉以提高强度。 ④结合 $O_2+2N_2=0.27\%$。 ⑤也利用不同的时效温度(480℃或900℉)进行固溶处理和时效。

Ti-6Al-4V是应用最为广泛的钛合金，占有钛总产量的约45%。非合金化牌号构成产量的约30%，

而所有其他的合金共同构成其余的25%。

一种非合金化牌号钛、α或接近-α合金、α-β合金或β合金的选择取决于所需要的力学性能、使用要求、成本问题以及其他一些在材料选择过程中应当考虑的因素。

非合金化钛

通常选择非合金化钛是出于对其优异的耐腐蚀性的需要，尤其是那些不要求高强度的场合。非合金化(工业纯)牌号的屈服强度(表3.4-1)的变动从170MPa(25ksi)到480MPa(70ksi)，并对应于其间隙原子和杂质含量水平的变化而变化。氧和铁是这些牌号的主要变化量，强度将随氧、铁含量的增加而提高。

α和接近-α合金

含有铝、锡和/或锆的α合金尤其适用于高温和低温的用途。富α合金在高温下的耐蠕变性一般比α-β和β合金更高。超低间隙原子的α合金(ELI牌号)能在低温下保持塑性和韧性，故Ti-5Al-2.5Sn-ELI被广泛用于这类用途。

与α-β和β合金不同，α合金不能通过热处理得到明显的强化。一般来说，α合金可以通过退火或再结晶去除因冷变形加工而产生的残余应力。α合金具有良好的焊接性，因为它们不易受热处理的影响。它们的锻压性一般比α-β和β合金差而且锻压的温度范围也比其窄，尤其在低于β的转变温度下。这种较差的锻压性表现是因为更容易发生的由应变所引起的疏松或表面裂纹，这也意味着在锻压规范中必须采用小压缩量的工步和频繁的再加热。

含有少量β稳定剂的α合金(如Ti-8Al-1Mo-1V或Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo)有时候也归类为“超-α”或“接近-α”合金。虽然它们含有一些保留的β相，但这些合金主要还是由α构成，其性状也更像α合金而不像α-β合金。

α-β合金

α-β合金含有一种或多种的α稳定元素或α-可溶性元素再加上一种或多种的β稳定元素。这类合金比接近-α合金在固溶处理后保留更多的β相，其具体的量就取决于β稳定元素的数量和热处理。

α-β合金能借助于固溶处理并时效进行强化。固溶处理通常都是在高达α-β两相区的某一温度下进行，随后在水、油或合适的淬火液里淬火。由于淬火的结果，存在于固溶处理温度中的β相会得以保留，或者在冷却过程中发生部分或全部的马氏体转变或晶核形成和长大的转变。其具体效果取决于合金成分、固溶处理的温度(在固溶温度下的β相成分)、冷却速率和截面尺寸。固溶处理后进行时效，通常在480~650℃(900~1200℉)使α析出，从而在保留下来或转变而成的β相里生成一种α和β的细微混合组织。转变动力学、转变产物和特定合金的具体效果可能是十分复杂的，有关其详细探讨已超过了本文的范畴。

固溶处理并时效能提高α-β合金的强度，使其超过退火或过时效状态合金的30%~50%或更多。固溶处理并时效的效果取决于截面尺寸，β稳定元素含量相对较低的合金(如Ti-6Al-4V)，其淬硬性也差，因此必须快速淬火才能获得显著的强化。以水淬的冷却速度淬硬截面大于25mm(1in)的Ti-6Al-4V，其速度还是不够快。淬硬性随β稳定元素含量的增加而提高，例如Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr的截面厚度达150mm(6in)都能获得相对均匀的淬透效果。对于一些中等β稳定剂含量的合金，可以强化其截面相对较厚的表面，但是其心部的强度和硬度会低10%~20%。通过热处理得到的强度是在固溶处理温度下所保留的β相体积分数的函数。合金成分、固溶温度和时效条件必须审慎选定和权衡，以此使成品获得所要求的力学性能。

虽然从钛工业的早期开始就利用实验室的方法研究α-β合金析出硬化的能力，但是相对而言却未见多少有关固溶处理和析出(时效)硬化合金在生产上的应用。这种情况正在出现转机，因为现已专门开发出用于时效硬化的像Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo和Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr这样的合金，以及某些高淬透性的β合金，由此提高强度超过退火合金的30%~40%。

β合金

β合金的β稳定元素比α-β合金的更多，而α稳定元素比较少。它们以高淬硬性为特征，其β相需通过薄截面的空气冷却和厚截面的水冷却才能得以完全保留。β合金具有优异的锻造性、冷轧性，并且在薄板成形中能比α-β合金或α合金更容易冷闸压弯成形。使用β合金进行较为复杂的三维应变型的成形加工是比较困难的，因为它们几乎呈现不出任何加工硬化和早期的颈缩发生。固溶处理后，β合金在450~650℃(850~1200℉)进行时效，将部分β转变为α相。α形成弥散细颗粒而存在于保留下的β中，以此达到相当于或超过时效α-β合金的强度水平。与α-β合金相比，β合金的主要缺点就是较高的密度、

较低的蠕变强度以及在时效条件下的较低拉伸塑性。虽然其拉伸塑性比较低，但是时效 β 合金的断裂韧度比起屈服强度与之相当的 α-β 合金来说，一般还是更高一些。

在固溶处理的条件下(100%保留 β)，β 合金有良好的塑性和韧性、相对低的强度和优异的成形性。固溶处理 β 合金会在稍高的温度下开始析出 α 相，所以它们若事先未经稳定化或过时效处理，则不适合于高温用途。

β 合金(至少为工业 β 合金)不管其名称，实际上都是亚稳态的，因为在常温里的冷变形加工能引起马氏体转变，或者加热到稍高的温度会造成部分地转变为 α 或其他转变产物。β 合金的主要优点就是它们在固溶处理的条件下有高淬透性、优异的锻造性和良好的冷成形性。

先进钛合金

如前所述，如今经按常规处理的锻压和铸造钛合金的使用温度极限为 595℃(1100℉)。这个极限主要是由于长期的表面和整体物理冶金稳定性问题，虽然蠕变强度随温度升高而明显地连续降低。为了将此温度提高到 700℃(1290℉)及其以上，钛基复合材料和铝化钛金属间化合物合金已经开发出来。下面将简要介绍这两种材料。更详细的内容可参阅本篇第 14 章。

钛基复合材料。开发含有连续碳化硅(SiC)纤维增强剂的钛基复合材料的目的是为了提高钛及其合金的高温性能。作为一种商用型的 SCS-6SiC 纤维，它有 140μm 的直径、33μm 的碳芯和富碳的表面。碳化硅纤维一般占这种复合材料 35%~40% 的体积分数。

至今还在使用的基体材料包括 Ti-6Al-4V、Ti-15V-3Sn-3Cr-3Al和 β21S(Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr)。上述最后一种合金，当用 SiC 增强时能承受高达 800℃(1500℉)的温度。

在经过评价的众多继续增强的钛复合材料技术中，只有高温/短时间轧合、热等静压和真空热压已被使用至相当的程度。等离子喷涂技术可用于将钛基体沉积在纤维上。

颗粒增强的钛基体复合材料是用粉末冶金工艺生产的。这个材料家族包括选用钛合金基体如 Ti-6Al-4V，并选择加入不同的添加量(如质量分数为 10%~20%)的各种陶瓷和金属间化合物添加物(例如 TiC、TiB_2或 TiAl)。借助冷等静压将这些材料压制成为近-净形状，再通过锻压或挤压对粉末坯块进行进一步的压实/精整。与未经增强的钛合金相比，颗粒增强材料在室温和高温下的抗拉强度和弹性模量都有所提高，并提高了在大约相同密度下的使用温度。

铝化钛。最近开发成功了几种基于铝化钛金属间化合物的新型材料。这些材料具有与钛几乎相同的密度，但是能用于更高的温度。有三种合金体系可以作为用于航空结构用途的选择即：Ti_3Al 基(取代号为 α_2)、TiAl 基(取代号为 γ)和 Ti_2AlNb 基正交金属间化合物。可以期待这些材料的潜在使用温度范围为 600~760℃(1110~1400℉)。一般 α_2 合金含有(原子百分数)23%~25% Al 和(原子百分数)11%~18% Nb。其他合金元素包括钒[高达(原子百分数)3%]和钼(原子百分数约为 1.0%)。γ 合金含有(原子百分数)48%~54% Al 和(原子百分数)1%~10% 的下列元素：钒、铬、锰、钽、钨或钼。正交型的含(原子百分数)21%~25% Al 和(原子百分数)25%~30% Nb。

然而，铝化物很难处理和加工成结构零件，因为它们在低温下的塑性和韧性十分有限，故要求非常高的处理温度。当需要大量变形才能把铝化物加工成产品类型时，这种缺点就很突出，例如在航空/航天结构中将其薄板用于蜂窝板芯或桁架板芯。

第2节 冶 炼

钛金属的生产过程从矿石到成品要经过三个主要步骤：①将含钛矿石还原成钛金属的疏松形式，称之为“海绵钛”。②熔炼海绵钛及废料，浇铸成锭块。③重熔、铸造成为成品型材，或进行粗加工，这时钛锭转变成一般的轧制件，接着进行从轧制件到成品型材的二次加工。结构铸件或轧制件还要求进行切削加工，在铸件修复或将铸件或轧制件进行结构组合时少不了焊接。在某些用途里，还要用到粉末冶金技术。在上述每一个步骤里，钛的成品型材的力学和物理性能会受一种因素或多种因素综合的影响。其中最重要的是：①特定合金元素和杂质的含量；②生产钛锭的熔炼工艺；③铸造工艺和铸件的体积，以及用于降低铸件的疏松度的致密化技术如热等静压工艺(HIP)的使用；④从钛锭到轧制品的机械加工方法；⑤在加工、制造和或热处理中，采用的最后一道工序。

熔炼

原材料

控制原材料对于钛及其合金的生产显得特别重要，因为有许多元素只要加入很少的量，就会对最终成品的这些金属性质产生重要的影响。生产钛所用的

原材料有：海绵金属形式的钛、合金元素（以中间合金的形式）和回收的钛废料（通常称为“回收料”）。

钛海绵。为控制钛锭的成分，它必须满足严格的技术指标。最重要的是钛海绵钛中一定不能含有硬、脆和难熔的氧化钛、氮化钛或复杂的氮氧化钛颗粒，如果将它们残留在后续的熔炼工序中，就会在最终的产品里起到裂纹源的作用。

碳、氮、氧、硅和铁一般都作为残余元素存在钛海绵里。这些元素必须控制在允许的低限度之内，因为它们会提高最终产品的强度并降低其塑性。

合金元素的纯度。它与钛海绵的纯度一样重要，必须以同样的重视程度防止不允许的残余元素——尤其是那些能在钛基体中形成难以熔化或高密度的夹杂物的元素的存在。

氧和铁的含量基本上决定了工业纯钛（ASTM 和 ASME 牌号 1、2、3 和 4）的强度水平以及钛合金的超低间隙（ELI）牌号与标准牌号之间在力学性能上的差别（表 3.4-2 可以说明这种影响）。对于较高的强度牌号，在钛海绵已有的残余量中有意加入氧和铁，以此得到更高的强度。另一方面，碳和氮通常被控制在最小的残余含量水平上，以此防止其脆化。

表 3.4-2　受氧和铁含量影响的退火钛薄板的拉伸性能

材　　料	最高含量（%）		最小抗拉强度		最小屈服强度[①]	
	O	Fe	MPa	ksi	MPa	ksi
非合金化钛，牌号 1	0.18	0.20	240	35	170	25
非合金化钛，牌号 2	0.25	0.30	345	50	275	40
非合金化钛，牌号 3	0.35	0.30	450	65	380	55
非合金化钛，牌号 4	0.40	0.50	655	95	485	70
Ti-6Al-4V	0.20	0.30	925	134	870	126
Ti-6Al-4V-ELI	0.13	0.25	900	130	830	120
Ti-5Al-2.5Sn	0.20	0.50	830	120	780	113
Ti-5Al-2.5Sn-ELI	0.12	0.25	690	100	655	95

①0.2%条件屈服深度。

回收废料。使用回收废料生产钛锭比单纯使用钛海绵更加经济。只要进行适当的控制，废料的加入是完全可行的——甚至用于关键结构用途，例如喷气发动机的旋转零件的材料。

所有各种废料都能重熔如：切屑、薄板边角料、毛坯上修整下的毛边毛刺以及碎块。为了很好地利用，废料在重熔之前必须进行彻底的清洗和仔细地按合金和纯度进行分类。在清洗过程中，必须将表面的氧化皮去除，因为在熔液中的氧化皮会产生难熔的夹杂物或在锭块中造成过度的疏松。用碳化物刀具切削而成的切屑是可以用的，但是必须将粘附在切屑上的碳化物颗粒清除干净，否则将会形成硬而密度高的夹杂物。合金回收废料控制得不好将会造成合金成分的偏离且成品金属性能的降低。冷床熔炼技术的开发是为了在熔炼高质量产品时消除高密度夹杂物的产生并将低密度夹杂物的发生率降低到最低限度（同时也作为熔炼某些种类废料较为经济的方法）。

钛锭

熔炼工艺。大部分钛和钛合金的熔炼工艺都是在电炉真空里熔炼两次，即所谓的“二次消耗电极真空熔炼工艺”。在这个两阶段的工艺中，钛海绵、回收料和合金添加料从开始就要通过机械方法或焊接固结在一起作为阳极，然后进行熔炼得到钛锭。通过第一次熔炼得到的锭块作为第二阶段的消耗电极使用。在有些情况里，将非消耗电极的电弧熔炼工艺用于在第一阶段熔炼用途不是很重要的钛锭。通常所有的熔炼都是在真空中完成的，但是无论如何，熔炼的最后阶段都必须采用消耗电极真空电弧工艺。

一般认为，对所有的用途来说，为了保证最终产品的均质度达到允许的程度，二次熔炼都是必要的。三次熔炼用于获得更好的均质性。三次熔炼还可以通过增加一次熔炼工序使显微组织中的富氧和富氮的夹杂物溶解，从而将它们减少到一个非常低的程度。发动机制造商通常要求旋转件等级的材料采用三次熔炼。

偏析和其他的成分变化会直接影响轧制件的最终性能。

在真空中，熔炼能减少钛中氢的含量并且基本去除其他挥发性物质。这有可能成就铸锭的高纯度。然而不规范的操作因素如空气泄漏、漏水、灭弧或甚至发生大的供电波动，都会影响最终产品的致密度和均质度。

还有一个因素就是锭块的大小。正常情况锭块的尺寸为直径650～900mm（26～36in）和重量3600～6800kg（8000～15000lb）。较大的锭块对于使用具有经济的好处，另外它对于在非常大的截面，例如直径为400mm（16in）或以上的短锭上获得细腻的宏观组织和

显微组织也很重要。直径大到1000mm(40in)及重量超过9000kg(20000lb)的锭块也已熔炼成功，但是由于增加锭块的尺寸会增加偏析的可能性，故生产大的锭块在提高其质量上有其局限性。

偏析。在钛锭中必须对偏析予以控制，因为它会造成多种不同类型的缺陷，而且这些缺陷又是难以借助均质化热处理或热处理与初轧工艺的组合进行消除的。

类型Ⅰ缺陷通常称为“高填隙瑕疵”，这是一种填隙式稳定化的α相区，它具有比其周围材料高得多的硬度和较低的塑性，而且还表现出较高的β转变温度。它们产生于钛海绵、中间合金或回收料中有浓度非常高的氮或氢。类型Ⅰ缺陷常常但并不总是与孔隙或裂纹相关。虽然类型Ⅰ缺陷有时也称为“低密度夹杂物”，但是它们的密度通常还是高于正常合金。

类型Ⅱ缺陷有时称为“高铝瑕疵”，这是一种延伸跨越多个β晶粒的呈现异常稳定化α相区。类型Ⅱ缺陷是由金属α稳定剂如铝的偏析所造成的，它们含有过高比例的初始α，其显微硬度仅稍高于邻近的基体。类型Ⅱ缺陷有时候会伴随着附近的β板条，既含铝量和硬度都较低的区域。这种状况一般与高蒸气压组分进入的封闭固化的缩孔中有关，并且在初轧的制造过程中，只是被揉入显微组织。板条通常产生在锭块的顶部，并且能用宏观腐蚀或阳极化蓝蚀检测出来。含有板条的材料通常必须经金相检查，以此确认由腐蚀所揭示的上述特征并非人为造成的痕迹。

β斑点作为另一种缺陷是材料中经过α-β处理和热处理的稳定化β小区域。其大小不到1μm，即它们包含有若干早期β晶粒。β斑点是初始α的缺失或所包含的初始α低于某一规定的最小数量。它们是由于局部区域里的β稳定剂含量高得不正常或者α稳定剂含量低得不正常所造成的。β斑点也是因为在含有强β稳定剂的合金锭块在凝固过程中发生的显微偏析所至。它们在用大直径锭块所生产的产品里最常被发现。β斑点也会在贫β合金如Ti-6Al-4V中发现，当这种合金在冶炼时被加热到接近β转变的温度。

对于飞机牌号钛，类型Ⅰ和Ⅱ的缺陷都是不允许的，因为它们会因此降低关键的设计性能。贫β稳定剂的合金如果以退火状态使用，其存在的β斑点可认为是无害的。另一方面，它们形成的区域也不完全是热处理的缘故，为此在显微组织标准中设置了不同α-β合金中的β斑点允许极限值。β斑点在富β的α-β合金中比在贫β的α-β合金中更为有害，而在β合金中则是不允许的。

初始加工

初始加工包括将钛锭加工成一般的轧制品：短坯、棒材、厚板、薄板、带材、挤压件、管材和线材的所有工序。此后很容易再用它们进行零件和结构件的二次加工。

初始加工对于形成其最终性能是非常重要的，因为许多二次加工工序极少甚至不影响其冶金学性能。只有某些二次加工工艺，如锻造和环轧对于形成材料的性能发挥主要作用。

短坯的压制

一般来说，生产用钛锭的首次切断就是在β温度范围里进行的初轧开坯工序。现代工艺利用在β转变温度以下进行大量的轧制加工，由此生产出组织细密的短坯。这些工艺都是在α区的高温里实施的，以此得到较多的压缩，并改善晶粒的细密程度和使表面破裂最小。对于要求最大的断裂韧度的用途，一般首选用β工艺(或α-β处理后,再进行β热处理)。

钛合金的最终性能受在β转变温度以上和以下的加工程度以及再结晶化的程度的强烈影响。这种加工会影响大尺寸截面的高α等级的强度。采用现代加工技术，短坯和锻造型材都容易在最终锻造前就达到所规定的拉伸性能。

轧制棒材、厚板和薄板的性能

棒材。直径达100mm(4in)的棒材采用单方向辊轧，其性能一般都受在α-β范围里总压缩量的影响。例如，用Ti-6Al-4V的100mm见方的短坯轧制成直径50mm(2in)圆棒的抗拉强度为140～170MPa(20～25ksi)，它低于用同样大小的短坯和在同样的温度下轧制到直径为7.8mm(5/16in)圆棒的强度。对于直径50～100mm的棒材，其强度不会随截面尺寸的增加而减小，但是其室温下的横向塑性和缺口应力断裂强度的确会变小。直径从大约75～100mm(3～4in)的Ti-6Al-4V退火棒材，也许达不到室温下预定的应力断裂极限——即使得经5h退火的缺口试件发生断裂的最小应力为1170MPa(170ksi)——除非材料经特殊双重退火。直径65～100mm(2½～4in)棒材的横向塑性比较低，因为这种尺寸的棒材不可能整体上获得较佳的织构组织。

厚板和薄板。普通的厚板和薄板在相对于最终轧制方向的横、纵两个方向展示相同的拉伸性能。这些特征对不同厚度的Ti-6Al-4V薄板的拉伸性能会产生有利的影响。其他的性能如耐疲劳性也会因这种类型

的轧制而得到改善。性能的方向性仅表现在厚度超过25mm(1in)的厚板在其横向方向的塑性略有降低。对于成形用途有些客户规定了抗拉强度在横、纵方向上的最大允差。

二次加工

二次加工指的是如模锻、挤压、热和冷成形、切削加工、化学蚀刻和连接的制造工艺，所有这些加工都是用于将轧制品生产成为成品的零件，还可利用切削加工、化学蚀刻和连接将铸件生产成为成品零件。上述每一种工艺都会强烈影响钛及其合金的性能，而无论这种影响是单一的还是由金属先前所经受的多种工艺相互作用的。

模锻

模锻除了能控制工件的形状之外的主要目的之一，就是要使其获得作为棒材和短坯一般所没有的力学性能组合。以锻件形式的抗拉强度、抗蠕变性、疲劳强度和韧性等全都比棒材或其他形式的更好。

锻造是用于生产锻压钛合金零件的普通方法。锻造过程及其后续的热处理可以用于控制显微组织和产品的最终性能。锻造所起的作用要多于仅仅造就形状的制造工艺。锻压和热处理成功的关键在于钛合金的β转变温度。图3.4-1以示意图表示对一种典型的α-β合金，如Ti-6Al-4V进行锻造和/或热处理可能适用的温度范围。在α-β区里的处理温度越高，冷却时能发生转变的β也越多。从高于β转变温度进行淬火就能生成一种完全转变的针状组织。通过处理而生成的球状(等轴)α和转变β组织的准确形式取决于相对于发生β转变的温度的锻造温度，而β转变的温度随一次一次的加热而变化，另外还取决于产生变形的程度和

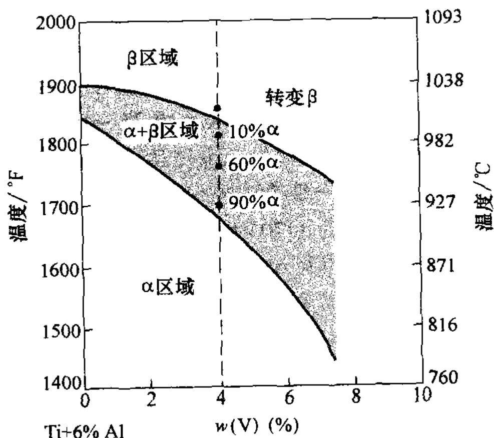


图3.4-1　表示锻造或热处理工艺结果的相图

性质。截面尺寸很重要，加工工序的次数应该也很关键。传统的锻造会要求二～三次的锻造工序，而等温锻造只需一次。图3.4-2所示是传统的锻造和后续热处理的工序示意图。固溶处理提供一次改善或调整锻造后显微组织的机会，而时效处理则能改良转变的β组织，以获得最佳的组织弥散度并提高其强度。

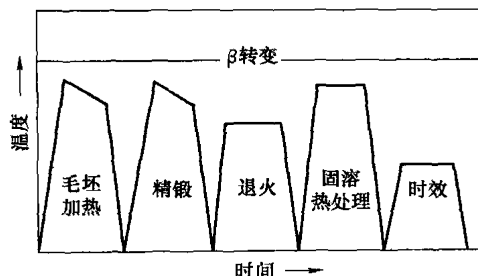


图3.4-2　生产α-β组织的传统锻造和后续热处理的工艺规范示意图。锻造和固溶处理的处理过程中常用温度为955℃(1750℉)，退火温度为730℃(1350℉)以及时效温度为540℃(1000℉)。退火和固溶处理用时间为30*min*～2h，时效为8h

显微组织的控制。显微组织的控制是成功处理钛合金的基础。不必要的组织(晶界α、β斑点、“通心粉”或伸长的α)会妨碍最佳性能的获得。钛锭组织能影响锻造产品。β相区锻造工艺尽管对某些力学性能产生负面影响但还是能降低锻造成本，而等温锻造是一种能减小压力和/或促进模具的充型和零件细节成型的方法，并实现更好的显微组织的控制。等温β相锻造正在使钛合金的抗蠕变性更强的零件上得到应用。

在α-β合金中最常见的、有代表性的显微组织如图3.4-3所示。从图3.4-3a过渡到3.4-3d一般会引起抗拉强度和疲劳强度的逐渐降低和损伤容限型性能得到不断的改善。图3.4-3a和3.4-3b之间显微组织的差别是由所经历的加工上的差别造成的。在薄板轧制过程中，温度随轧制的进程而降低，并且终轧温度明显低于其终锻造温度。于是，在薄板的最终加工温度下只有较少的残留β，并导致明显的“球状”α显微组织(见图3.4-3a中的黑色特征就是残留或转变的β)。随着残留β的增多，最终的锻造温度也明显较高，由此说明为什么有较大量的层状转变型β组织。再结晶退火组织(见图3.4-3c)的缓慢冷却使得初始α在冷却过程中生长并消耗掉大部分的β。在某些α-α边界和三交叉点上可以观察到残留β。固溶处理和时效并不常用于Ti-6Al-4V(见图3.4-3e)，却是航空紧固件的标准热处理。

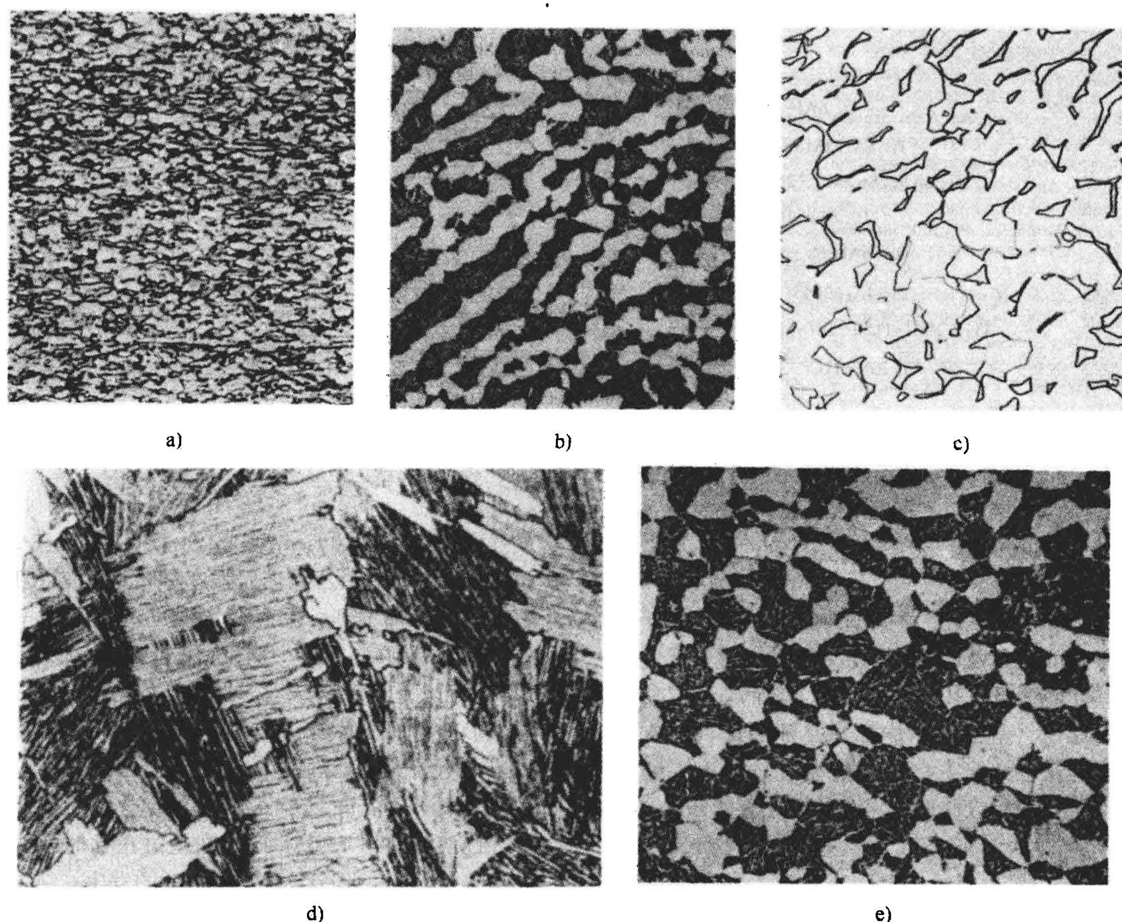


图3.4-3 形变热处理对Ti-6Al-4V的显微组织的影响

a) 薄板，从925℃(1700℉) 开始轧制，在730℃(1350℉)退火8h和炉冷。组织由稍有延长的α晶粒(浅色)和晶间β(灰色)所组成。250×。b) 在955℃(1750℉)锻压后，低于β转变温度。延长的α晶粒(浅色)，用短坯的小压缩量(20%)压制而成，在短坯的含有针状α的转变β的基体中存在着粗糙、片状的α。250×。c) 厚板，在925℃(1700℉)重结晶退火1h，以50~55℃/h(90~100℉/h)的速度冷却到760℃(1400℉)，然后空冷。等轴α并晶间β。500×。d) 锻件，在705℃(1300℉)β退火2h呈现出92%蓝状针织组织。e) 锻件。在955℃(1750℉)固溶处理1h，水淬和在705℃(1300℉)退火2h。在含有细针状α的转变β基体(黑色)里存在等轴α晶粒(浅色)。500×。见文中有关这些工艺/显微组织的组合如何影响性能的阐述

图3.4-4总结了几种钛合金的α-β锻造相对β锻造的深入研究结果。虽然β锻造后的屈服强度总不如α-β锻造后的那样高，然而β锻造材料的缺口抗拉强度和断裂韧度值始终是比较高的。由β锻造得到的综合性能还是与α-β锻造并β退火得到的相似，后者是较为常用的工艺。

β锻造合金容易出现转变β或针状显微组织(见图3.4-3d)，然而α-β锻造合金显示较多的等轴组织(见图3.4-3b)。对每一种类型的显微组织(即针状的对等轴的)都要求进行权衡，因为每一种类型的显微组织都有自己的独特性能。表3.4-3列出等轴和针状显微组织的相对优点。

表3.4-3 等轴和针状显微组织的相对优点

等轴的
较高的塑性和成形性
较高的热盐应力腐蚀的应力门槛值
较高的强度(用相当的热处理)
较好的耐氢性(氢的允受限度)
较好的低周和高周耐疲劳(引发)性能
针形的
超耐蠕变性
较高断裂韧度值
较高疲劳裂纹生长抗力

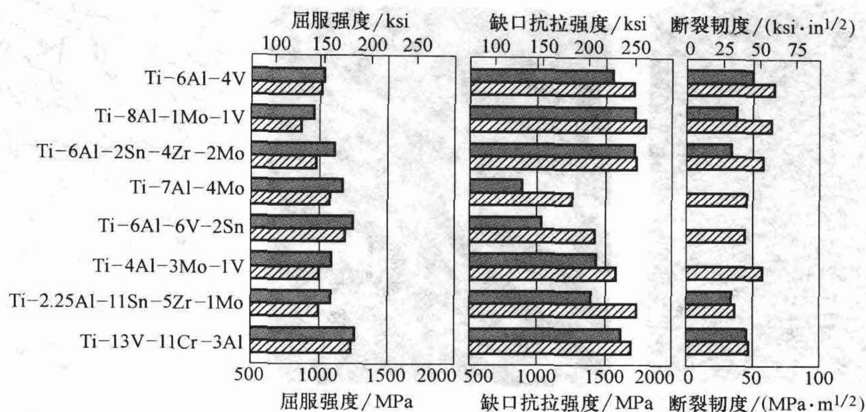


图3.4-4 α-β锻造和β锻造的钛合金的力学性能的比较。斜影线的矩形条代表α-β锻造材料，黑色的矩形条代表β锻造材料

挤压

作为有别于辊轧的一种轧制工艺，挤压用于制造长度很长的横截面不变的产品。就像其他产品类别一样，其性能也受工艺的影响。其重要的变量是挤压温度和挤压比。全部的性能都与其他锻压材料有些不同，因为正常情况下挤压件是在β转变以上的温度中进行生产的，以此形成完全的转变β组织。

成形

钛和钛合金的薄板和厚板都是通过冷成形进行应变硬化的，它会使除β合金外的后面合金组成形为复杂形状更加困难。这一般会提高抗拉强度和屈服强度，但导致塑性有所下降。钛金属在冷成形中表现出高度的回弹性。为克服这种性质，钛必须大大地过度成形或者像经常所做的那样在冷成形之后进行热精整。

热成形对其最终性能不会产生很大的影响。在595~815℃(1100~1500℉)的温度下，成形可以使材料的变形更加容易并同时消除变形材料的应力，它还能使回弹降低到最小限度。在任何成形工序中的实际净效果取决于成形过程中的总变形及实际温度。钛金属还容易在高温中发生蠕变，在成形的温度中保持载荷(蠕变成形)是又一种能获得所要求形状的成形方法，且不需要对很大的回弹进行均衡。

包辛格(Bauschinger Effect)效应。在所有的成形工序中，钛及其合金具有对包辛格效应的敏感性，这时一个方向的塑性变形会造成作用于反方向的应力所引起的屈服强度减小。包辛格效应在室温下最为明显：室温下的塑性变形(1%~5%的拉伸延长)总会引起压缩屈服强度的显著减小，而与合金的初始热处理或强度无关。例如Ti-4Al-3Mo和Ti-6Al-4V在2%的拉应变条件下，其压缩屈服强度降低到固溶处理材料数值的一半都不到。提高变形温度可减小包辛格效应，继之以彻底的热应力消除更能将其完全去除。

故而，包辛格效应要求所有结构用途的冷成形和温成形的零件都必须进行退火。温度降低到时效温度可以去除经固溶处理的β钛合金中的大部分包辛格效应，而时效温度对于α和α-β合金并无效果。对于经固溶处理的Ti-6Al-4V，在超过正常时效温度下的加热或塑性变形会导致过度时效的发生，结果造成所有力学性能的降低。

切削加工

钛合金的切削加工所要求的切削力仅仅稍高于切削钢所需要的，但是这种合金所具有的冶金学特征，使其比硬度相当的钢的切削更加困难。β合金是最难以切削的钛合金。当为特定的合金成分和工艺规范选择了合适的切削条件时，就能够在可以接受的成本前提下得到合理的切削加工生产率。表3.4-4列出多种钛合金与其他材料(表中的数字高表示切削性好/成本低)在切削性能上的比较。当将磨削作为最终切削工序时应该特别小心，因为疲劳强度会明显降低。

连接

粘接、机械紧固、冶金粘结(如钎焊)和焊接都能用常规方法成功地应用于钛和钛合金的连接。只要连接设计得合适，以上前三种连接不会影响这些金属的性能。冶金粘结包括在其连接件粘结一起的过程中，所有以弥散和变形为主要作用的固态连接工艺。由于这些工艺都是在β转变以下、但又接近的温度下进行的，故无论是由一般在该温度下加热引起的还

表 3.4-4 多种钛合金与其他材料在切削性能上的比较

合金	状态①	切削性评价②	合金	状态①	切削性评价②
铝合金 2017	STA	300	Ti-5Al-2.5Sn	A	30
B1112 再硫化钢	HR	100	Ti-6Al-4V	A	22
1020 碳钢	CD	70	Ti-6Al-6V-2Sn	A	20
4340 合金钢	A	45	Ti-6Al-4V	STA	18
工业纯钛	A	40	HS25(含 Co)	A	10
302 不锈钢	A	35	Renė41(含 Ni)	STA	6

①STA，固溶处理并时效；HR，热轧；CD，冷拉；A，退火。 ②以 B1112 钢评价定为 100。

是由污染所造成的冶金效应都应当是可预测的。处置得当的连接具有与基体金属相类似的性能，并且由于弥散粘结发生在 α-β 区域的高温里，故材料所表现的是与高温退火相类似的性能。就像大多数的合金，最后的低温退火会形成一般退火材料的性能特征，并使其具有热稳定性。

焊接对性能的影响。焊接对材料性能具有最大的潜在影响。在所有各种焊接中，因填隙杂质(如氧和氮)所造成的污染必须予以严格控制，以此使焊接件保持应有的塑性。合金成分、焊接程序和后续热处理对于决定焊接接头的最后性能都是非常重要的。

具有代表性的合金以及各类焊缝的力学性能可以概括如下：

- 焊接一般能提高强度和硬度；
- 焊接一般会降低拉伸和弯曲的塑性；
- 牌号 1、2 和 3 非合金化钛的焊缝无需进行焊后热处理，除非材料将在强还原气氛中承受高应力。在这种情况里，消除应力或退火将证明是有用的。此外，如果器件是在高温中运行则建议消除应力。高温会加速氢的迁移，形成会造成氢脆的高残余应力。
- 像 Ti-6Al-6V-2Sn 这种富 β 合金中的焊缝发生断裂的可能性很大，它们极少甚至没有任何的塑性变形。通过包括从高退火温度的缓慢冷却的焊后热处理能够使焊缝塑性得以改善。
- 富 β 稳定化的合金能够焊接，而且这样的焊缝能形成良好的塑性。然而，在某些 β 合金焊接中，形成满意的性能特别困难。

焊接方法。钛合金可以用气体钨极电弧焊在惰性气氛中进行焊接，也可以用电子束焊或激光进行焊接。电子束焊和激光焊的焊缝一般不用金属焊条，并且焊道有高深宽比。这两者的结合形成厚截面的优异焊缝，它具有非常接近基体金属的性能。

焊接必须在严格控制的环境里进行，用于防止会导致焊缝金属脆化的填隙原子的形成。中、小型的焊接件在焊接过程中可以密闭在受介质控制的容器里。较大型的焊接件可借助于便携式的容器对其进行局部的封闭，使焊缝的前后两侧都维持保护气氛里，并使其冷却到大约 540℃(1000℉)以下。也许较为常用的方法就是利用装在焊炬上的“附件”喷向焊缝背面的保护气氛。

粉末冶金

具有类似于其他形式产品性能的粉末冶金(P/M)产品目前多有生产。表 3.4-5 对钛及多种钛合金在室温下的锻压、铸造和粉末冶金的工艺作了比较。然而，钛粉的制造工艺既慢成本又高，从而导致粉末冶金作为一种钛零件的制造方法发展缓慢。

表 3.4-5 在室温下锻压、铸造和粉末冶金的钛及其多种合金产品的比较

产品和状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率	面积压缩	夏比冲击吸收功		断裂韧度	
	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)	率(%)	J	lbf·ft	MPa·m^1/2	ksi·in^1/2
非合金化钛										
锻压棒材，退火状态	550	80	480	70	18	33	35①	26①	—	—
铸造棒材，铸造状态	635	92	510	74	20	31	26①	19①	—	—
P/M 压坯，退火②	480	70	370	54	18	22	—	—	—	—
Ti-5Al-2.5Sn-ELI										
锻压棒材，退火状态	815	118	710	103	19	34	—	—	—	—
铸造棒材，铸造状态	795	115	725	105	10	17	—	—	—	—
P/M 压坯，退火和锻造③	795	115	715	104	16	27	—	—	—	—

（续）

产品和状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率	面积压缩率(%)	夏比冲击吸收功		断裂韧度	
	MPa	ksi	MPa	ksi	(%)		J	lbf·ft	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
Ti-6Al-4V										
锻压棒材，轧制退火	965	140	875	127	13	25	—	—	—	—
锻压棒材，再结晶退火	970	141	875	127	16	27	27	20	52	47
锻压棒材，β退火	955	139	860	125	9	21	—	—	91	83
铸造棒材，铸造状态	1000	145	895	130	8	16	—	—	107	97
铸造棒材，退火状态	930	135	825	120	12	22	17.5	24	103	94
铸造棒材，退火状态④	895~930	130~135	825~855	120~124	6~10	10~15	—	—	—	—
铸造棒材，STA⑤	935~970	136~141	855~900	124~130	5~8	6~14	—	—	—	—
铸造棒材，STA⑥	965~1025	140~149	860~925	125~134	5~8	10~14	—	—	—	—
铸造棒材，HIP	1000	145	870	126	8	16	—	—	109	99
P/M 压坯，退火②	825~855	120~124	740~785	107~114	5~8	8~14	—	—	—	—
P/M 压坯，退火和锻造③	925	134	840	122	12	27	—	—	—	—
P/M 压坯，STA	965	140	895	130	4	6	—	—	—	—

①-40℃(-40℉)下的夏比值。 ②大约94%密度。 ③大约100%密度。 ④730或845℃(1345或1555℉)。 ⑤α-β固溶处理和时效(STA)：955℃(1750℉)1h+冷却620℃(1150℉)2h。 ⑥β固溶处理和时效(STA)：1025℃(1875℉)1h，冷却，+620℃(1150℉)1h。

生产钛粉末冶金零件中最为重要的考虑就是氧含量、纯度和污染物质。氧对P/M的不利影响与它对锻压产品的影响如出一辙。处置其粉末特别是非常细的粉末必须非常小心，因为它们对氧具有高度亲和性并会有高自燃性。纯度对于所有的粉末产品都很重要，而且纯度对于经过调和的元素细粉末的固化来说也是关键性的，其中空隙的含量必须减少到最低限度——残留氯化物含量是最终产品的残余疏松度的主要因素。从最后达到的疲劳性能来看，污染是其关键(它们对疲劳特性是有害的)。

铸造

所有的钛铸件都根据普通的锻压合金确定其成分。并没有严格按铸造用途开发的工业用钛合金。这也是不寻常的，因为在其他金属系统里都有专门作为铸造合金而开发的合金，为此常需要解决某些如锻压合金成分的铸造性低下的问题。如今在任何钛合金铸造中，再也不会碰到这种有关铸造性或流动性的这种不同寻常的问题。

采用钛铸件替代锻压钛产品的主要原因是成本。铸件可以通过提高设计通用性、较高的金属利用率或降低切削或成形成本来得到这种成本上的优点。一般来说，越复杂的零件，采用铸件也就越经济。

钛铸件不像其他金属的铸件，其铸件的拉伸和蠕变-断裂强度与相应锻件的相等或近似相等。钛铸件大部分强度允许的技术参数都与锻件的相同。铸造产品以伸长率和断面收缩率所表征的典型塑性都低于同样合金的锻件产品的典型值。其断裂韧度和抗裂纹增长性超过相应的锻件材料。然而，铸造钛的疲劳强度却低于锻压钛的。好在铸造钛的疲劳强度可以借助于进一步的处置和热处理得以增强。

与锻压钛产品相似，钛铸件主要有四个领域的用途：航空产品、海上用途、工业(腐蚀)用途和运动器材。工业纯钛绝大部分应用于腐蚀的用途，而Ti-6Al-4V是应用于航空和海上用途的主要合金。Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si越来越多地被选用于高温用途。铸件还采用Ti-5Al-2.5Sn、Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn和Ti6Al-6V-2Sn以及若干欧洲的合金供货。

钛铸件现在广泛用于航空工业，并且在化学工业、海洋及其他工业的应用程度虽然还较小却也在不断增加。运动器材，主要是熔模铸造的高尔夫球杆头，现在是钛的第二大用途(仅次于工业用的航空工业)。钛铸件只占整个钛工业的一小部分——大约为总产量1%~2%(质量分数)。

铸造工艺

钛铸件是在切削加工而成的石墨铸型中浇铸的，精密的失蜡铸件则采用适当的熔模铸造方法。以此获得明显提高的设计复杂性、尺寸精度以及明显降低的表面粗糙度，而且可用于铸造大型零件。其疏松度也

还是一个潜在的问题。然而借助于热等静压工艺，钛铸件的内部致密性可以改善到其疏松度或小的孔穴都检测不到的程度。

钛铸件的焊接修复也属于一般的铸造工艺。然而，由于钛在焊接过程中吸入氧、氢和其他杂质而变脆，故钛铸件的焊接修复必须小心进行。研究表明适当地进行焊接修复是不会降低 Ti-6Al-4V 的力学、疲劳、蠕变或断裂性能的。

热等静压铸件

20 世纪 70 年代后期，钛铸件的热等静压(HIP)成为一种生产实践。作为工业标准的 HIP 规范是在 900℃（1650℉）温度下，用氩气以高达 105MPa (15ksi)的压力加压 2h。

起初，热等静压的应用只是为了其极佳的零件修复结果，这些零件在修复前用 X 射线检测被判为不合格。这种技术的效果导致将 HIP 应用于常规零件的想法，但是这种想法的高成本使其经济性成为问题（事实上,所有的航空铸件都要进行 HIP）。然而，对于某些铸件的形状使用传统的冒口进行适当补缩实际上是不可能的，而且为了符合航空无损检测的标准而采用焊接使缩孔闭合。

从技术观点来看，热等静压也是一种热处理，虽然一些研究称，HIP 即使有也极少能单独用其增强 Ti-6Al-4V的力学性能。热等静压的合金的性能取决于相对于 β 转变的 HIP 温度和后 HIP 热处理。对于低标准质量的铸件，热等静压工艺能提高原本较低的数据离散度极限，并且还提高铸件产品可靠性的置信度。

热等静压被很多人认为是一种能使铸件内在质量标准的定义得以简化的工艺。同时，HIP 的应用也保证了亚表层显微疏松的弥合，因此使显微疏松不会由于呈现在经后续切削或抛光的表面上而影响其表面粗糙度，或有可能成为疲劳裂纹的生长点。

铸造性能

铸造钛合金在强度上与成分相同的锻压合金相等或近似相等。然而一般塑性低于相应的锻压合金，但还是高于锻压金属的许用最小值。因为 Ti-6Al-4V 铸件已应用于航空用途上，故这种合金已建立了最为充分的数据库。表 3.4-6 所列是在室温下的工业纯铸造钛和八种铸造钛合金的典型拉伸性能。图 3.4-5 所示是 Ti-6Al-4V 铸件的平面应变断裂韧度与 Ti-6Al-4V 厚板以及其他锻压钛合金之间的比较。其高韧性是由于铸件中固有的 β 处理型的显微组织。

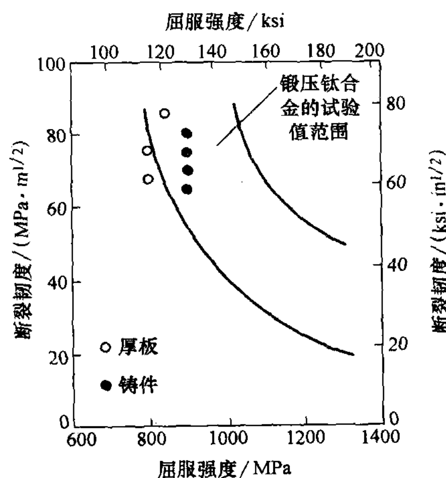


图 3.4-5 Ti-6Al-4V 铸件的断裂韧度与 Ti-6Al-4V 厚板及其他钛合金的比较

表 3.4-6 在室温下钛合金铸件(用铸件加工得到的棒材)的典型拉伸性能

合金①②	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
商业纯(牌号 2)	552	80	448	65	18	32
Ti-6Al-4V，退火	930	135	855	124	12	20
Ti-6Al-4V ELI	827	120	758	110	13	22
Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si，β-STA③	938	136	848	123	11	20
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo，退火	1006	146	910	132	10	21
Ti5.8Al-4.0Sn-3.5Zr-0.5Mo-0.7Nb-0.35Si，β-STA③	1069	155	952	138	5	8
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo，β-STA③	1345	195	1269	184	1	1
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo，β-STA③	1330	193	1241	180	7	12
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn，β-STA③	1275	185	1200	174	6	12

①通过改变固溶处理和时效(STA)热处理可以形成不同性能。 ②ELI，超低间隙。 ③β-STA，在 β-相区域内的固溶处理，再进行时效。

一般来说，通过HIP取得疲劳性能的改善和疲劳数据离散性的减小(见图3.4-6)。像Ti-6Al-4V这样的合金铸件，一般所具有的静态和疲劳性能都低于其锻压产品。如断裂韧度、疲劳裂纹生长率和耐应力腐蚀性的这些断裂性能，都优于经轧制退火的Ti-6Al-4V锻压件。

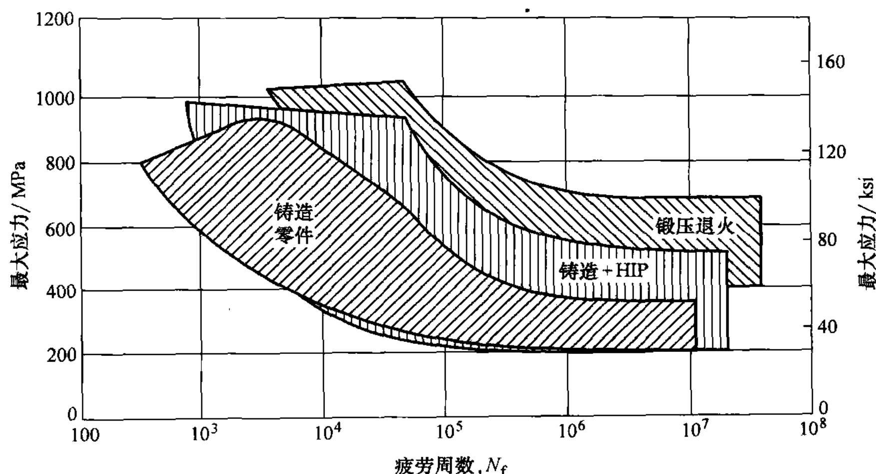


图3.4-6 铸造、铸造并HIP和$R=+0.1$的锻压的Ti-6Al-4V的平滑轴向室温疲劳率比较

第3节 耐腐蚀性

非合金化钛对于许多天然的介质包括海水、体液以及水果和蔬菜汁都有很高的耐腐蚀性。钛广泛应用于处置盐溶液(包括氯化物、次氯化物、硫酸盐和硫化物)、湿氯气和硝酸溶液。另一方面，热、浓和低pH的氯化物盐(如沸腾的30% $AlCl_3$和沸腾的70% $CaCl_2$)会腐蚀钛。温或浓的HCl、H_2SO_4、H_3PO_4和乙二酸的溶液也是有损害的。一般来说，所有在自然界呈还原性的酸性溶液都能腐蚀钛，除非它们含有抑制剂。强氧化物包括无水红烟硝酸和90% H_2O_2都会造成侵蚀。离子化的氟化物，如NaF和HF会使表面活化并造成快速腐蚀，干的氯气特别有害。

钛在空气中并高于大约540℃(1000℉)的温度下的抗氧化性十分有限，尽管近来已开发出一些能在较高的温度中使用的合金，但还是建议不要在长期在暴露高于该温度中的结构用途里使用。液态或气态的氧、四氧化氮或红烟硝酸都能造成钛在冲击载荷或高于屈服点的载荷作用下的强烈反应，此时其保护表面遭受破坏而暴露出“活化”表面。

钛可用于盛储低温的液态或超临界的氢，但是高于-100℃(-150℉)的氢会使钛发生严重脆化。当氢气高速流动或钛的表面涂层遭受破坏时，这种脆化的潜在能力就会增强。

非合金化钛和许多钛合金中的焊缝区域都具有与基体金属相同的耐腐蚀性。其他制造工艺(如弯曲、成形和切削)看上去对其基本耐腐蚀性也不会有任何影响。

电化学腐蚀

钛与不同种类金属的耦合通常不会加速钛的腐蚀，除非处于还原的介质中钛不会被钝化。在还原的条件下，当耦合较多的惰性金属时，它具有一种类似于铝的电势并且被加速腐蚀。

在大部分的介质里，钛在任何电偶中都是阴极件。它会加速其他耦合件的腐蚀，但是在大多数情况里，其自身并不受影响。如果钛在介质中暴露的表面积相对于也在其他金属中暴露的表面积很小，则钛对于其他金属腐蚀速率的影响可以忽略不计；然而如果钛的暴露面积大大超过其他金属的暴露面积，则其他金属就会产生严重腐蚀。

因为在任何电偶中钛几乎都是阴极件，故从表面逸出的氢的数量与其流过的电化学腐蚀电流成正比。由此在表面形成一种稳定的并不会引起任何问题的氢化物膜。但是氢在高于75℃(170℉)的温度下会弥散进入钛金属，造成脆化。在某些环境中氢化钛是不稳定的，因此发生分解或反应，并造成金属的损耗。

合金添加

当钛暴露在如盐酸、硫酸的还原酸中时，腐蚀反应的阳极控制起着主要的作用。通过加入能减轻阳极活动性的合金元素应该能提高其耐腐蚀性。这是通过以下三类合金元素得以实现的：①使合金的腐蚀电位朝正的方向转移(阴极合金化)；②提高合金的热力学稳定性，以此降低钛的阳极化溶解的能力；③提高

钛的钝化倾向。第一组包括贵重金属，如铂、钯和铑。第二组包括镍、钼和钨。第三组包括锆、钽和铬，可能还有铌。在将贵重金属作为钛的合金添加使用的方面已经做了相当多的工作。Ti-0.2Pd 的开发成功就是这项工作的成果之一，它在还原介质中的耐腐蚀性大大超过非合金化钛(并已发现钌的添加也具有同样的效果)。此外，在合金化的热力学稳定化方面的工作促使了 Ti-2Ni 的产生，它适用于热海水的介质中，因有时海水有缝隙腐蚀的问题。

不同研究都表明加入钼能提高钛的耐缝隙腐蚀的能力。编号 12 的工业用合金 Ti 含有 0.3% Mo 和 0.8% Ni，它综合了镍和钼的一些有利性能且又能排除其负面影响。这种合金具有在高温海水中的优异耐点蚀和缝隙腐蚀的能力，而工业纯钛有时会在里面遭受侵蚀，另外它还有较好的耐氧化环境，如硝酸中腐蚀的能力。

缝隙腐蚀

钛会在含有氧化剂的盐水溶液中遭受缝隙腐蚀。虽然在热氯化物的溶液中发生的钛缝隙腐蚀是最常见的，但是在碘化物、溴化物和硫酸盐溶液里也会发生。其敏感性随着温度的提高、氯化物离子浓度的增加、溶解氧浓度的减小以及 pH 值的减小而增加。在中性的 pH 值和低于 120℃(250℉)的温度下，见不到缝隙腐蚀的发生。但是在较低的 pH 值和低于 120℃(250℉)的温度下，有时也会发生缝隙腐蚀。

冲蚀腐蚀和气蚀

对于大部分材料都存在着临界速度，超过此温度表面保护膜就会被冲刷掉而使腐蚀加速发生。这种加速侵蚀就是所谓的冲蚀腐蚀。一种材料与另一种材料的临界速度有很大的差别，并且可以低至 0.6～0.9m/s(2～3ft/s)。对于钛，它在海水里的临界速度大于 27m/s(90ft/s)。多种冲蚀腐蚀的试验表明钛耐这种侵蚀的能力非常强。

若流体中存在着磨料颗粒(如砂子)，冲蚀腐蚀就会大大加剧。当海水包含着细砂子以 1.8m/s(6ft/s)的速度流经一般的钛冷凝管时，钛能表现出超级耐其侵蚀的能力。

耐气蚀性试验已证明，钛是最耐气蚀破坏的金属之一。

应力腐蚀开裂

非合金化钛一般不会发生应力腐蚀开裂(SCC)，除非它有高含氧量(0.3%或以上)。为此，在化学工业中，SCC 是不需考虑的问题，非合金化钛也是其最常用的材料。另一方面，某些主要用于航空工业的钛合金会遭受 SCC 侵蚀。钛及其合金一般不发生应力腐蚀，除非预先存在着裂纹或尖锐裂纹样的缺陷。

最早报道的有关非合金化钛发生 SCC 的例子之一就是在红烟硝酸中的。另外，还发现暴露在这种酸中会形成一种可自燃的表面沉积。但没有迹象表明这两种现象是有关系的，但是在酸里加入 1.5%～2.0% 的水能完全抑制这两种反应。此后，非合金化钛在热干氯化钠、甲醇、盐酸溶液、海水、氯化溶剂、四氧化氮、汞和镉中的 SCC 也陆续得到证实。

影响对 SCC 的敏感性的重要因素之一就是合金成分。铝的加入会增加对 SCC 的敏感性，含量超过 6% Al 的合金一般会对应力腐蚀产生敏感。锡、锰和钴的加入是有害的，而锆是呈中性的。β 稳定剂如钼、钒和铌是有利的。钛合金对 SCC 的敏感性还受热处理的影响。

裂纹在海水中的加速扩张

已经知道钛在海水里有很强的耐腐蚀性。然而对于某些合金，若零件有锐利的缺口或裂纹将会加速裂纹的扩张，从而使其丧失在海水中的耐断裂性。

暴露于海水中并不见得会缩短钛合金的使用寿命，对此如 Ti-6Al-4V 和 Ti-5Al-2.5Sn 在实验室的试验足以表明。这两种合金都已成功地应用于飞机许多年而从未报告过发生失效。显然，在使用中也从未见到过导致裂纹加速扩张的情况(主要是裂纹的存在)。

选择正确的合金能够防止裂纹在海水中的加速扩张。含有超过 6% Al 的合金对此特别敏感。锡、锰、钴和氧是有害的，而 β 稳定剂如钼、铌和钒都有可能减小或消除在这种状况里的敏感性。非合金化钛倒是不敏感的，除非它含有超过大约 0.3% O_2。

热盐腐蚀

高于 260℃(500℉)温度下，卤代化合物会造成钛和钛合金的损坏。氯化物盐——特别氯化钠——都可能有害。残留的盐会造成表面点蚀或甚至某些合金在高拉伸载荷的作用下发生开裂。虽然在使用中很少见到钛零件的开裂，但是制造商会在应力消除的过程中，遇到钛零件由于热盐腐蚀而发生开裂的现象。追查其原因是在热加工之前没有将经过氯化的清洗液蒸汽清除干净，氯化物也可以追溯到一些其他的工艺流体(包括自来水)，甚至手指印痕上的残留盐分。

由盐造成的损坏程度与温度、暴露时间和拉应力

的大小有直接关系，工艺流程、合金成分、盐成分和其他的介质条件也都有重要影响。对热盐腐蚀的敏感度看来还在相当程度上受工艺和合金的添加所影响。因此通过对这些因素的控制，应该有可能防止这种现象在使用中的发生。

固态和液态金属的脆化

当某些钛合金与液态的镉、汞或含银的钎焊合金接触时，它们会在拉应力作用下产生裂纹。这种类型的脆化不同于SCC，虽然两者有些相似性。液态金属脆化看上去是因沿晶界的弥散和脆相的形成而造成的，由此又导致塑性的丧失。

在拉应力作用下，钛还会因为与某些固态金属（例如镉和银）的接触而发生脆化。使用失效发生在常温下的镀镉钛合金以及高于315℃（600℉）温度下经银钎焊的钛零件。

镀银零件不应该用于与温度高于230℃（450℉）的应力作用下的钛接触。镀镉零件，如过盈配合或压装的衬套都不应该在任何温度下用于与钛接触。作为一条一般性的规则：钛不要用于与镉接触的场合。

第4节　所选合金的性能、成分和应用

性能

性能是由成分和加工工艺来确定的。一般来说，拉伸弹性模量的范围从100～120GPa[(14.7～17)×10^6psi]，并随温度的升高而减小。控制材料的织构和热处理能引起模量的改变。物理性质会随成分的变化而变化，有些性质会随加工工艺而改变，因为加工会影响显微组织。

拉伸性能包含一个很大的数值范围（见表3.4-7），从中到高强度的合金一般具有的抗拉强度为895～1065MPa（130～155ksi）（表3.4-7）。

抗拉强度最高的合金，其蠕变性能通常随温度的升高而明显下降。图3.4-7和图3.4-8比较了几种钛合金的抗拉强度和150h的蠕变强度。有趣的是钛合金的疲劳强度在温度达到315～425℃（600～800℉）之前，是不会随温度的升高而有明显的下降。一种有关的设计性能即断裂韧度（K_{Ic}）也是十分有意思的，特别在高强度钛合金的应用中。表3.4-8列出了与显微组织有关的三种高强度合金的典型断裂韧度值。韧性是受织构的影响并且与其试验方向有关的（表3.4-9）。图3.4-9所示的疲劳裂纹的生长率（da/dN）表明在不同批量之间都有相当的不同。这种性能非常依赖于显微组织（热处理）。β退火能减小da/dN到十分之一。

表3.4-7　所选钛合金轧制件在室温下的典型拉伸性能允许值

合金	抗拉强度		屈服强度		塑性	
	MPa	ksi	MPa	ksi	伸长率（%）	断面收缩率（%）
Ti-6Al-4V	895	130	825	120	10	20
Ti-6Al-6V-2Sn	1065	155	995	145	10	20
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	1030	150	965	140	10	20
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	895	130	825	120	10	25
Ti-8Al-1Mo-1V	895	130	825	120	10	20

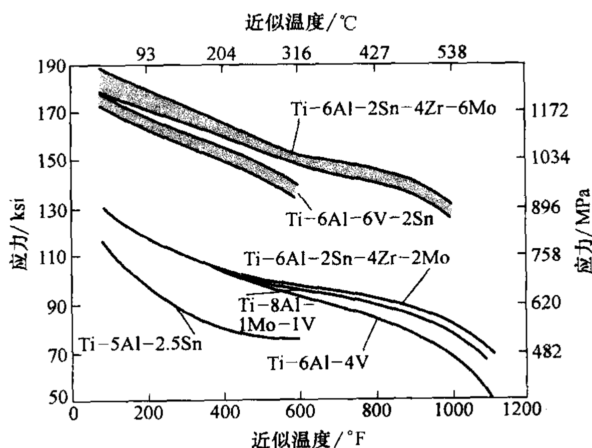


图3.4-7　报道的不同钛合金的典型抗拉强度比较

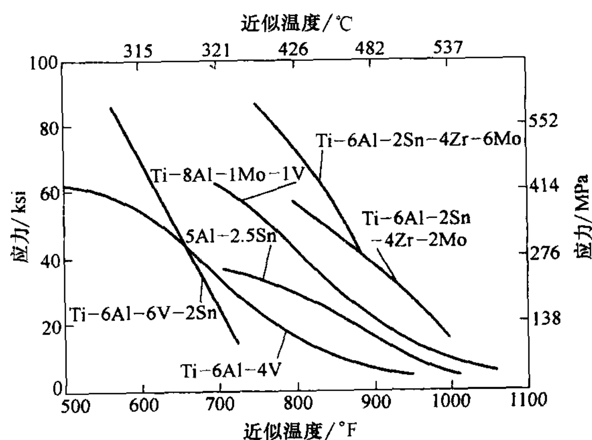


图3.4-8　报道的不同钛合金的典型150h、0.1%蠕变强度的比较

表 3.4-8 高强度钛合金的典型断裂韧度值

合金	α形态	屈服强度		断裂韧度(K_{Ic})	
		MPa	ksi	MPa · $m^{1/2}$	ksi · $in^{1/2}$
Ti-6Al-4V	等轴的	910	130	44 ~ 66	40 ~ 60
	转变的	875	125	88 ~ 110	80 ~ 100
Ti-6Al-6V-2Sn	等轴的	1085	155	33 ~ 55	30 ~ 50
	转变的	980	140	55 ~ 77	50 ~ 70
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	等轴的	1155	165	22 ~ 23	20 ~ 30
	转变的	1120	160	33 ~ 55	30 ~ 50

表 3.4-9 带织构的 Ti-6Al-2Sn-4Zr -6Mo 板材的试验方向对力学性能的影响

试验方向①	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	断面收缩率(%)	弹性模量		K_{Ic}		K_{Ic}试件方向
	MPa	ksi	MPa	ksi			GPa	10^6psi	MPa · $m^{1/2}$	ksi · $in^{1/2}$	
L	1027	149	952	138	11.5	18.0	107	15.5	75	68	L-T
T	1358	197	1200	174	11.3	13.5	134	19.4	91	83	L-T
S	938	136	924	134	6.5	26.0	104	15.1	49	45	S-T

①报告所称的高强度基极是沿横向方向的，跟法向呈 90°。其强度节点位于与纵向(即轧制)方向成 45°和沿平板法向成大约 40°的方向的位置上。L，纵向；T，横向；S，短向。

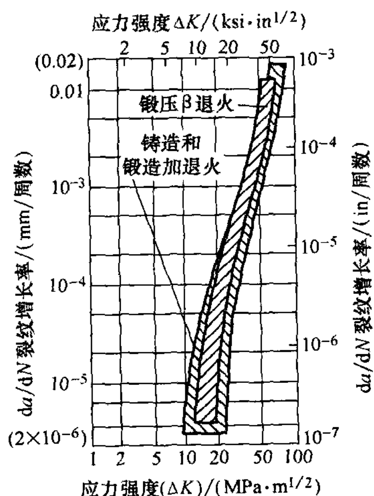


图 3.4-9 锻压 β 退火 Ti-6Al-4V 以及铸件和铸件加 HIP 的 Ti-6Al-4V 的疲劳裂纹扩张率特性的数据比较

成分和应用

非合金化 Ti 牌号1

普通名称。非合金化钛，工业纯(CP)钛。

UNS 编号。R50250。

成分极限。0.03 最大的 N，0.10 最大的 C，0.015 最大的 H(最大 H 值的偏差，棒材：0.0125；坯料和铸件：0.0100)，0.18 最大的 O，0.20 最大的 Fe，0.05 最大的其他元素(每一种)，0.3 最大的其他元素(总量)，余量为 Ti。

典型用途。加工时要求高塑性，而使用时要求相对较低强度的用途，要求具有最高成形性且其低的铁和间隙元素含量，可使其耐腐蚀性得到增强的一些其他用途。焊接性。

使用注意事项。在室温或高温下并处于空气或还原气氛的过程中，钛在酸洗溶液(或其他用氢还原的溶液)中会发生氢脆化。在高温的大气中暴露也会造成氧气和氮气的污染，这种污染会随温度升高和暴露时间的延长而加剧。钛和液体氧之间或钛和红烟硝酸之间都会发生剧烈的氧化反应。

一般的腐蚀行为。钛尽管具有高的活性，但是在许多侵蚀性的环境中还是有极强的耐腐蚀性。例如，它具有强耐海水和硝酸腐蚀的能力。其一般的耐腐蚀性是由于当钛暴露于空气中时，会在其表面快速形成薄而又有惰性的氧化膜，或在某些侵蚀性介质中在其表面形成的钝化膜。

Ti-5Al-2.5Sn
Ti-5Al-2.5Sn-ELI

普通名称。A-110，Ti-5-2½(标准牌号)，Ti-5-2½-ELI(超低间隙牌号)。

UNS编号。R54520（Ti-5Al-2.5Sn），R54521（Ti-5Al-2.5Sn-ELI）。

成分极限。0.035～0.05最大的N，0.05～0.10最大的C，0.01～0.02最大的H，0.12～0.20最大的O，0.25～0.50最大的Fe，0.05～0.10最大的其他元素(每一种)，0.30～0.40最大的其他元素(总量)，4.0～6.0Al，2.0～3.0Sn，余量为Ti。

典型用途。由于其直到深冷温度的良好韧性和塑性，主要以退火状态用于深冷用途里(ELI牌号)。正是这些性能使它在宇宙飞船高压燃料叶片泵上与储氢部位材料上得到应用。Ti-5Al-2.5Sn还在燃气轮机发动机的高温用途里使用过，但是这些应用基本上都逐渐停止了。

使用注意事项。Ti-5Al-2.5Sn(及其ELI改进型)在室温下的用氢还原的溶液中、在高温下的空气或还原气氛中、甚至在深冷低温下的压力氢气中都会发生氢脆。在高温下的空气中还会发生氧和氮的污染，随暴露时间的增加以及温度的升高这种污染也会加剧。Ti-5Al-2.5Sn对热盐(尤其是氯化物)应力腐蚀开裂和对在常温下的水溶液中加速裂纹扩张都很敏感。对于Ti-5Al-2.5Sn所应用的环境应该严格控制，以此保证材料不至于劣化。Ti-5Al-2.5Sn-ELI对于使性能劣化的环境具有更大的宽裕度，仅使用高纯度的合金还是不能保证完全不发生劣化。Ti-5Al-2.5绝对不能与液态氧接触。

一般腐蚀行为。类似于牌号2与3的非合金化钛。标准合金和它的高纯度改进型(Ti-5Al-2.5Sn-ELI)对于许多活性的物质(如海水和硝酸)都有很强的耐腐蚀性。在深海(深度约为1500m或1mile)暴露751天，也不会产生任何腐蚀(估计腐蚀率<2.5μm/a或<0.1mil/a)。在流速约为36m/s(120ft/s)的海水里，这种合金展现的腐蚀率为5.5μm/a(0.22mil/a)。

耐特定腐蚀剂。指在高温(热盐应力腐蚀)下，对于一些由固态盐类(如氯化物)所造成的腐蚀的特殊敏感性。在315℃(600℉)温度下、在高于大约207MPa(30ksi)的应力作用下，经长达100h在盐里的暴露会造成点蚀和开裂。在较低的温度下，在较高的应力作用下和较长的时间暴露之后可能发生应力腐蚀开裂。在预先存在裂纹的情况下，在室温的海水、氯化物溶液及其他活性溶液里可能发生裂纹的加速扩张。

Ti-8Al-1Mo-1V

普通名称。Ti-8-1-1、Ti-811。

UNS编号。R54810。

成分极限。0.05最大的N，0.08最大的C，0.015最大的H，0.12最大的O，0.30最大的Fe，0.10最大的其他元素(每一种)，0.4最大的其他元素(总量)，7.35～8.35Al，0.75～1.25Mo，0.75～1.25V，余量为Ti。

典型用途。要求高强度、高焊接性具有低密度材料的场合。目前用于燃气轮机的发动机叶片上。

Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo

普通名称。Ti-6-2-4-2、Ti-6-2-4-2S、Ti-6242、Ti-6242S、6-2-4-2。

UNS编号。R54620。

成分极限。5.5～6.5Al，1.8～2.2Sn，3.6～4.4Zr，1.8～2.2Mo，0.06～0.1Si，0.25最大的Fe，0.05最大的C，0.05最大的N，0.12最大的O，0.0125最大的H(棒材和坯料:0.0100最大的H,锻件和薄板:0.0150最大的H)，0.10最大的其他元素(每一种)，0.3最大的其他元素(总量)，余量为Ti。

典型用途。用于需要温度高于540℃(1000℉)的高的强度和韧性、优异的耐蠕变性以及应力稳定性的燃气轮机发动机和飞机舱口的用途上的锻件和平轧产品。

Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo

普通名称。Ti-679。

UNS编号。R54790。

成分极限。2.00～2.50Al，10.50～11.50Sn，4.00～6.00Zr，0.80～1.20Mo，0.15～0.27Si，0.12最大的Fe，0.15最大的O，0.040最大的C，0.040最大的N，0.008最大的H，余量为Ti。

典型用途。喷气发动机叶片和飞轮，大型的舱壁锻件，其他要求高温蠕变强度加上稳定性及短时强度的用途。

耐特殊腐蚀剂。在温度290～480℃（550～900℉)下，其耐热盐应力腐蚀开裂的能力优于Ti-6Al-4V、Ti-8Al-1Mo-1V和Ti-5Al-5Sn-5Zr。

Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si

普通名称。TIMETAL834、IMI834。

UNS 编号。无。

成分极限。5.5~6.1Al，3.0~5.0Sn，3.0~5.0Zr，0.5~1.0Nb，0.25~0.75Mo，0.2~0.6Si，0.04~0.08C，0.075~0.150 O，0.05 最大的 Fe，0.03 最大的 N，0.006 最大的 H，余量为 Ti。

典型用途。这是一种中等强度的合金，它具有在任何一种传统的和工业钛合金中均属的最高使用温度（600℃或 1200℉）。它的主要用途包括航空燃气轮机发动机工业上用的压缩机圆盘和叶片。

Ti-6Al-4V
Ti-6Al-4V-ELI

普通名称。Ti-6-4、Ti-6-4 ELI、Ti-64 ELI。

UNS 编号。R56400（Ti-6Al-4V）、R56401（Ti-6Al-4V-ELI）。

成分极限。Ti-6Al-4V：5.5~6.75Al，3.5~4.5V，0.05 最大的 N，0.10 最大的 C，0.015 最大的 H，0.40 最大的 Fe，0.20 最大的 O，0.1 最大的其他元素（每一种），0.5 最大的其他元素（总量），余量为 Ti。

典型用途。Ti-6Al-4V 是应用最为广泛的钛合金。将其熔化生产为标准和 ELI 两种成分以便提供轧制退火、再结晶退火或 β 退火的组织之用，有时将其进行固溶处理和退火（固溶处理并时效状态的淬硬性极小，大到约 19mm 或 0.75in）。轧制退火是最普通的热处理，再结晶和 β 退火用于 ELI 牌号以提高其耐损坏特性。ELI 牌号能提供最佳的耐损坏特性，但是在疲劳强度中遭受明显的欠缺。它应用于飞机燃气轮机圆盘和叶片，并且以轧制品的形式广泛用于飞机舱口结构件以及其他要求具有温度高达 315℃（600℉）的强度的用途，还能用于高强度的假体移植。

Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si

普通名称。TIMETAL 550、IMI 550。

UNS 编号。无。

成分极限。3.0~5.0Al，1.5~2.5Sn，3.0~5.0Mo，0.2 最大的 Fe，0.7 最大的 Si，0.27 最大的 O+N，0.0125 最大的 H，余量为 Ti。

典型用途。IMI 550 是一种主要在航空工业中应用于发动机和舱口部件的中等强度合金。典型的零件包括襟翼滑轨和发动机压缩圆盘。

Ti-6Al-6V-2Sn

普通名称。Ti-6-6-2、Ti-662。

UNS 编号。R56620。

成分极限。0.04 最大的 N，0.05 最大的 C，0.015 最大的 H，0.20 最大的 O，0.10 最大的其他元素（每一种），0.4 最大的其他元素（总量），5.0~6.0Al，5.0~6.0V，1.5~2.5Sn，0.35~1.00Fe，0.35~1.00Cu，余量为 Ti。

典型用途。要求在高于 315℃（600℉）温度下的高强度用途。这种合金以薄板、轻型厚板、挤压件和小型锻件的产品形式用于强度要求高于对 Ti-6Al-4V 所要求的飞机舱口结构件上。其用途一般仅限于二次结构件，因为它的较低断裂韧度和疲劳性能将其原本高强度效率的优势降低到最低限度。

Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo

普通名称。Ti-6-2-4-6、Ti-6246。

UNS 编号。R56260。

成分极限。5.5~6.5Al，3.6~4.4Zr，1.8~2.2Sn，5.5~6.5Mo，0.04 最大的 C，0.04 最大的 N，0.12 最大的 O，0.15 最大的 Fe，余量为 Ti。

典型用途。燃气轮机发动机用的中等温度范围的锻件，特别用于压缩机圆盘和叶片零件。可用于锻件毛坯、薄板和厚板的坯料和棒材。还应当考虑温度高达 400℃（750℉）时的长时间承载用途和温度高达 540℃（1000℉）时的短时间承载用途。

Ti-10V-2Fe-3Al

普通名称。Ti-10-2-3。

UNS 编号。无。

成分极限。2.6~3.4Al，9.0~11.0V，1.6~2.2Fe，0.13 最大的 O，0.05 最大的 C，0.015 最大的 H，0.30 最大的其他元素（总量），余量为 Ti。

典型用途。要求温度高达 315℃（600℉）的强度从中到高、韧性高的棒材、厚板或锻件以及厚度达 125mm（5in）的锻件。这种合金将高强度与高韧性结合起来的特性优于任何一种其他工业钛合金。还能应用于要求在表面和心部具有拉伸性能均匀性的用途。

Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr

普通名称。βC、β-C、38-6-44。

UNS 编号。R58640。

成分极限。3.0~4.0Al，5.5~6.5Cr，3.5~4.5Mo，7.5~8.5V，3.5~4.5Zr，0.3 最大的 Fe，0.03 最大的 N，0.12 最大的 O，0.03 最大的 H，0.005 最大的 C，0.4 最

大的其他元素(总量)，其余为Ti。

典型用途。 βC用于紧固件、弹簧和扭力棒。它还在油、气和地热井里作为管件和铸件使用。

Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si

普通名称。 TIMETAL 21S、β21S、21S。

UNS 编号。 R58210。

成分极限。 2.5～3.5Al，2.4～3.0Nb，14.0～16.0Mo，0.15～0.25Si，0.2～0.4Fe，0.05最大的C，0.11～0.15的O，0.05最大的N，0.015最大的H，余量为Ti。

典型用途。 β21S是一种独特的β合金，它具有高达大约650℃(1200℉)的优异抗氧化性，而且其耐蠕变性也优于Ti-6Al-4V。此外，它也是仅有的用于商用飞机能防止高温液压流体对其侵蚀的合金。这种性能的组合导致其在商用飞机的发动机舱和排气室的应用。TIMETAL 21SRX作为这种不含铝的合金的改进型正在被研究应用于假肢，因其模量很接近骨骼。

Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn

普通名称。 TIMETAL 15-3、Ti-15-13、15-3-3-3。

UNS 编号。 无。

成分极限。 14～16V，2.5～3.5Al，2.5～3.5Cr，2.5～3.5Sn，0.25最大的Fe，0.015最大的H，0.05最大的N，0.13最大的O，0.05C，余量为Ti。

典型用途。 这主要是一种高强度的冷成形合金薄板。它应用于要求高强度、冷成形性和良好焊接性的用途。航空用途包括夹头、支架、拖板螺母、弹簧和灭火器瓶。它还可用于高强度铸件。

第5节　有关钛的精选参考文献

下面所列的参考文献分为两部分。第一部分包括介绍钛和钛合金的金属物理学、工艺、性能和用途的综述性书/章节。第二部分重点在于总结钛合金的各种性能(力学、物理、磨损和腐蚀)的资料手册。还有一些信息资料出自由TMS-AIME(warrendale，PA)、Plenum出版社(New York，NY)和由法国冶金学会(Sociéty Francaise de Métallurgie)出版的学术会议论文集，以及刊载于由ASTM(West Conshohocken，PA)出版的特种技术刊物(Special Technical Publications，STPs)。

书/章节

- *Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing,* I. Weiss, R. Srinivasan, P.J. Bania, D. Eylon, and S.L. Semiatin, Ed., TMS, 1996.
- *Beta Titanium Alloys in the 1990's,* D. Eylon, R.R. Boyer, and D.A. Koss, Ed., TMS, 1993.
- E.W. Collings, *The Physical Metallurgy of Titanium Alloys,* American Society for Metals, 1984.
- *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys,* R. Boyer, G. Welsch, and E.W. Collings, Ed., ASM International, 1994.
- *Microstructure/Property Relationships of Titanium Alloys,* S. Ankem and J.A. Hall, Ed., TMS, 1994.
- *Proceedings of the Technical Program from the 1996 International Titanium Applications Conference,* International Titanium Association, 1997.
- *Titanium '92 Science and Technology,* F.H. Froes and I.L. Caplan, Ed., TMS, 1993.
- *Titanium '95* (The Proceedings of the Eighth World Conference on Titanium), P.A. Blenkinsop, W.J. Evans, and H.M. Flowers, Ed., The University Press, 1996.
- *Titanium: A Technical Guide,* M.J. Donachie, Jr., Ed., ASM International, 1988.
- *Titanium Technology: Present Status and Future Trends,* D. Eylon, F.H. Froes, and H.B. Bomberger, Ed., Titanium Development Association, 1985.

综述文献

- D. Eylon and F.H. Froes, Titanium P/M Products, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 647–660.
- D. Eylon, J.R. Newman, and J.K. Thorne, Titanium and Titanium Alloy Castings, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 634–646.
- F.M. Kustas and M.S. Misra, Friction and Wear of Titanium Alloys, *Friction, Lubrication, and Wear Technology,* Vol 18, *ASM Handbook,* ASM International, 1992, p 778–784.
- S. Lampman, Wrought Titanium and Titanium Alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 592–633.
- R.W. Schutz, Stress-Corrosion Cracking of Titanium Alloys, *Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation,* R.H. Jones, Ed., ASM International, 1992, p 265–297.
- R.W. Schutz and D.E. Thomas, Corrosion of Titanium and Titanium Alloys, *Corrosion,* Vol 13, *ASM Handbook,* ASM International, 1987, p 669–706.
- Titanium and Titanium Alloys, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials,* J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p 347–360.
- L. Wagner and J.K. Gregory, Fatigue and Fracture Properties of Titanium Alloys, *Fatigue and Fracture,* Vol 19, *ASM Handbook,* ASM International, 1996, p 829–853.

第5章 锌和锌合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，527~542页；《ASM手册》第13卷腐蚀，1987，432~445页和755~769页。其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

非合金化形态的锌是一种蓝白色的金属，密度为7.1g/cm^3，熔点为420℃（788℉）和沸点为906℃（1663℉）。它容易铸造并结晶成为六角紧密型结构。锌还容易加工成为各种锻压产品。锌对大气腐蚀有良好的耐腐蚀性，这是使其用途得到最为广泛开拓的性质。锌是钢的最有效的通用牺牲保护镀层。

锌能以较纯的形式制成扁坯、锭块、颗粒、粉末和粉尘，与氧结合还能成为氧化锌粉末。锌扁坯生产成三种牌号（表3.5-1）。当锌作为合金目的使用时，其不纯度极限值是非常重要的。超过不纯度的极限值会造成力学和耐腐蚀性能的下降。纯锌颗粒主要用于加入锌的电镀槽里，锌粉末和锌粉尘用于电池和提高耐腐蚀性油漆。氧化锌作为一种颜料用于底漆和面漆（富锌的有机和无机镀层），作为还原剂用于化学工艺中和作为通用添加剂用于橡胶制品的生产。

表3.5-1 锌扁坯的级别和成分（ASTM B6）

牌号	UNS编号	化学成分（质量分数，%）							
		Pb	Fe最大	Cd最大	Al最大	Cu最大	Sn最大	非锌的总合金量（最大）	Zn（最小，按其不同）
特高牌号	Z13001	0.003最大	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.010	99.990
高牌号	Z15001	0.03最大	0.02	0.02	0.01	—	—	0.10	99.90
原西方的	Z19001	0.5~1.4	0.05	0.20	0.01	0.20	—	2.0	98.0

锌工业

粗锌生产。目前世界上超过95%的粗锌都是用浮选回收硫化锌（锌闪矿）进行生产的。事实上所有工业萃取工艺的第一步都是通过焙烧这种硫化物使其转变成为更加活性的氧化锌。生产金属锌的第二步就是用加热或电解的方法。作为要求使用颗粒状的产品的加热工艺，几乎都是采用烧结的专门方式生产一种粗糙的原料；然而电解锌生产并不要求使用粗糙颗粒形原料，流化床焙烧已经成为最为广泛应用的技术。

在热还原过程中，烧结氧化锌和加热焦炭的混料在鼓风炉中燃烧，然后生成的锌蒸汽进入冷凝器通过液态铅（铅雨）的喷洒进行洗涤。液态锌在冷却的环路中从铅里分离出来。

生产锌的一种更为普遍的重要方法就是电解工艺。锌的电解还原是从将经焙烧的氧化锌溶解于硫酸而开始的。经过这个浸溶阶段后，将纯净的电解液倒入电解池，池中有铅合金构成的阳极和由铝薄板制成的阴极。因此锌沉积在阴极并定期地把它剥离取下，然后熔化、浇铸成扁坯。

再生锌生产。全世界锌的回收再生工业占其全部生产的大约20%。锌废料的来源包括锌铸件、含锌合金（如铜基、镁基和铝基合金）、旧的锌屋面以及在镀锌钢的再处理过程中所产生的锌烟道尘。有关再生锌的更详细内容可参阅本手册（下册）第4篇第10章。

锌的应用。锌用于五个主要领域：作为钢和铁的镀层和腐蚀防护的阳极，锌铸造合金，作为合金元素用于铜、铝、镁及其他合金，锻压锌合金和锌化学制品。在其防腐蚀类别中，热浸或连续镀锌占了锌消耗的主要部分。几乎所有锌合金铸件都采用压铸铸造。在含锌合金中，铜基合金如黄铜中的锌消耗量最大［在某些黄铜里使用高达40%（质量分数）的Zn］。其他重要的含锌合金包括铝基合金［达8%（质量分数）的Zn］和镁基合金（达6%（质量分数）的Zn）。轧制锌是供应的锻压锌合金中的主要产品形式，尽管拉制线材、挤压件和锻件也有生产。在锌化学物质的类别中，氧化锌是主要化合物。近来，锌消耗的趋势反映

在表3.5-2里。如同表中所列，美国所消耗的锌中50%以上用于铁和钢的镀锌。

表3.5-2　1996年锌在美国的主要应用

应　　用	千　　吨	百分比①(%)
电镀	654	54
锌合金铸件	229	18.9
黄铜	155	12.8
氧化锌	80	6.4
其他②	92	7.6
合计	1210	100

①因百分比圆整，此列百分比值相加之和可以不为100%。　②包括轧制/锻压锌。源自国际铅锌研究组织(ILZRO)。

锌镀层

锌作为铁和钢的防腐蚀镀层是作为其金属在世界范围里最大的一种应用。金属锌镀层借助以下工艺应用于钢：

- 借助金属熔池(热浸镀锌)；
- 用电化学的方法(连续电镀和批量电镀工艺)；
- 借助熔化金属的熔喷(热喷)；
- 用机械的方法以锌粉的形式(机械镀层)。

锌镀层能用于许多不同类型的产品，从小的紧固件到连续的带材，到大型结构型材和组件。有关锌镀层的进一步内容可以参阅本手册(下册)第4篇第9章。

热浸镀锌

热浸镀锌工业是目前在镀层方面消耗锌的最大行业。它分为两部分：

- 钢带的连续浸镀生产；
- 结构型材和制造后产品的电镀。

经镀锌的产品可以用传统的技术如焊接和螺钉进行连接。

传统的带材镀锌。它所利用的是一种名义含量为0.20% Al和余量锌的合金进行生产。钢表面镀层厚度(单面总量)一般小于25μm(0.001in)或约175g/m²(0.573oz/ft²)。其镀层具有优异的粘着性和成形性。这些特性连同其用传统焊接技术的良好焊接性使得镀锌钢带在汽车制造业上得到特别诱人的应用。电镀钢带还应用于建筑业，其相当大量的是以预涂漆的状态应用。经过和不经过涂漆的镀锌钢带还大量地应用于装备工业。有些镀锌钢带还要经过所谓镀锌层弥散处理的热处理使镀层转变成铁-锌合金。镀锌层弥散处理用于建筑产品上已许多年了，而且最近扩大到了汽车零件。近年来，耐腐蚀性得到改进的新型钢带镀层，即Galfan(5% Al)和Galvalume(55% Al)已经推出市场。Galfan纳入标准ASTM B750，而Galvalume归入标准ASTM A792。

制造后(批量)镀锌。这是一种含有(质量分数)达1% Pb和余量为锌的无铝的锌牌号，应用于制造后的镀锌。大多数的技术指标都要求范围从85～100μm(0.0034～0.004in)或500～600g/m²(1.6～2.0oz/ft²)为其最小镀层厚度。镀层的厚度通过浸没时间予以控制，而时间又受制于带基的厚度；对于某些活性的牌号钢(硅镇静钢)，即使只含少量的硅，其镀层厚度也可以厚得多。现已开发成功浓度(质量分数)分别为0.04%和0.08%的添加少量铝(Polygalva合金)或镍(Technigava合金)的专用锌电镀工艺，以控制其镀层厚度。

适用后制造镀层的传统市场用途包括电力和微波输送塔，与高速公路有关的产品如护栏、道路指示牌和路灯电杆，一些工业方面(如化工、石油化工、农业和纸浆、造纸工业)的结构用途，排水设备产品、饮用水管线，热交换器以及混凝土构件中的钢筋等。

电解镀锌(Electrogalvanizing)和电镀锌(Zinc plating)

电解镀锌。用于带材的电解锌镀层在汽车应用上日益重要。这些镀层用于高速、高电流密度的电镀锌线上。纯锌以及锌镍、锌铁也都生产。其镀层一般比热浸镀的更加均匀、平滑和薄。对于镀锌钢板的汽车用途来说，耐腐蚀性、镀层在钢表面的附着性、成形性、焊接性和油漆性都是至关重要的性质。

电镀锌。锌的镀层也可以通过批量电镀镀于铁和钢的表面。将需要电镀的物件置于一个装有锌盐溶液的电镀池中，并让一个外加的直流电通过溶液。以消耗正电极或直接在电镀溶液中加入锌盐的方式为电镀池提供锌。

在所有的镀锌工艺中，电镀锌是最为精密的，因此特别适用于精密的物件如仪表零件，这时精细的光洁度是必不可少的。钢紧固件如螺钉、螺母、螺栓和垫圈常都要通过电镀来满足耐大气腐蚀和外观的要求。镀锌零件几乎都要以铬酸盐转化膜进行钝化，用于提高其防腐蚀性。电镀锌也常用于涂漆。还能借助电镀锌铁、锌镍和锌钴合金进一步提高其耐腐蚀性。

热喷镀和机械镀覆

热喷镀。这就是所谓的金属喷镀，它应用于防腐蚀所规定的厚镀层(75～180μm，或3～7mil)。其工艺适合在现场操作，并能用于对已有结构件进行修整。

通常采用比常规的热喷镀合金所要求的更薄镀层(加上适当的有机油漆涂层)的复合涂层系统就可能获得非常长的使用寿命。

在典型的热喷涂工序中，将纯锌(专用的高牌号)或Zn-15Al喷涂在需要防护的钢表面。锌合金是以粉尘的形式或者由火焰或电弧进行雾化的圆棒而提供的，随后用高速气流喷射在带基表面上。

机械镀覆。这是一种在旋转鼓中进行的批量生产工艺。在处理过程中，工件在锌粉末、化学试剂和玻璃珠的混料里翻滚，通过翻滚作用在工件表面生成镀层。这种技术适用于以特种弹簧钢、表面淬火钢或这两种材料一起制成的紧固件的镀覆，因为这些紧固件的性能会遭受热浸镀槽高温的负面影响。机械镀覆还应用于规定要用相对较厚镀层或需要防止发生氢脆的用途。

锌合金铸件

锌合金广泛用于重力压铸件和压力压铸件上。当作为一般的铸造合金使用时，锌合金可以采用像高压压铸、低压压铸、砂型、金属型(铁模、石墨模或石膏模)、自旋(硅橡胶模)、熔模(失蜡)、连续或半连续以及离心铸造的一类工艺进行铸造。锌合金还能用半固态铸造法生产。如表3.5-2所示，锌用于铸造合金的广泛应用程度仅次于镀锌。

压铸件

锌合金的采用压力铸造已经超过65年了。但直到最近所有的锌合金都是以亚共晶的成分为主，即它们的含铝量(接近4.0% Al)低于共晶的化学组成5.0% Al。最近，一类含铝量较高(>5.0% Al)的过共晶锌-铝合金日益广泛地作为压铸合金使用。这种合金原来是作为重力铸造合金而开发的(见下面“重力铸件”所述)。它们的强度超过亚共晶锌合金。目前压力铸造合金的成分如表3.5-3和表3.5-4所示。力学和物理性能则如表3.5-5和表3.5-6所示。

表3.5-3　普通锌合金压铸件和用于压铸件的锌合金铸锭的常规成分

合金[①]			化学成分(质量分数,%)								
UNS编号	ASTM代号	普通代号	Cu	Al	Mg	Fe 最高	Pb 最高	Cd 最高	Sn 最高	Ni	Zn
铸件(ASTM B86)											
Z33520[②]	AG40A	No. 3	0.25 最高[④]	3.5~4.3	0.020~0.05[⑤]	0.100	0.005	0.004	0.003	—	余量
Z33523[②]	AG40B	No. 7	0.25 最高	3.5~4.3	0.005~0.020	0.075	0.0030	0.0020	0.0010	0.005~0.020	余量
Z35531[②]	AC41A	No. 5	0.75~1.25	3.5~4.3	0.03~0.08[⑤]	0.100	0.005	0.004	0.003	—	余量
Z35541	AC43A	No. 2	2.5~3.0	3.5~4.3	0.020~0.050	0.100	0.005	0.004	0.003	—	余量
铸锭形(ASTM B240)											
Z33521[③]	AG40A	No. 3	0.10 最高	3.9~4.3	0.025~0.05	0.075	0.004	0.003	0.002	—	余量
Z33522[③]	AG40B	No. 7	0.10 最高	3.9~4.3	0.010~0.02	0.075	0.002	0.002	0.001	0.005~0.020	余量
Z35530[③]	AC41A	No. 5	0.75~1.25	3.9~4.3	0.03~0.06	0.075	0.004	0.003	0.002	—	余量
Z35540	AC43A	No. 2	2.6~2.9	3.9~4.3	0.025~0.05	0.075	0.004	0.003	0.002	—	余量

注：为判别合格与否，应按照ASTM E 29所规定的圆整步骤将所观测的或分析计算得到的数值圆整到最接近所用规定极限值的最右一位单位。

①ASTM合金代号是依据ASTM B275命名的，UNS代号是依据ASTM E527命名的。UNS编号中的最后一位数字用于区分相似成分的合金。每一种合金的铸锭和铸件类型的UNS代号都不是以相同的序列命名的。　②锌合金压铸件可以含有镍、铬、硅和锰，其含量分别为0.02%、0.02%、0.35%和0.06%。未见记载达到上述含量的这些元素会有任何有害影响，所以无需对这些元素进行分析。　③用于压铸的锌合金铸锭可以含有镍、铬、硅和锰，其含量分别为0.02%、0.02%、0.035%和0.05%，未见记载达到上述含量的这些元素会有任何有害影响，所以无需对这些元素进行分析，只有Z33522需要进行镍分析。　④对于主要商业应用，处于0.25%~0.075%范围的铜含量不会对压铸件的使用产生负面影响，并不应作为不合格的判别依据。　⑤镁的含量可以低至0.015%，只要铅、镉和锡的含量分别不要超过0.003%、0.003%和0.001%。

表 3.5-4　以直接浇铸和铸锭重熔方式生产铸件的锌-铝合金的砂型和压铸的铸造合金的常规成分

合金		化学成分(质量分数,%)							
		添加元素				杂质元素③			
通用牌号	UNS 编号①	Al	Cu	Mg	Zn②	Fe max	Ph max	Cd max	Sn max
铸件(ASTM B 791)									
ZA-8	Z35636	8.0~8.8	0.8~1.3	0.015~0.030	余量	0.075	0.006	0.006	0.003
ZA-12	Z35631	10.5~11.5	0.5~1.2	0.015~0.030	余量	0.075	0.006	0.006	0.003
ZA-27	Z35841	25.0~28.0	2.0~2.5	0.010~0.020	余量	0.075	0.006	0.006	0.003
铸锭(ASTM B 669)									
ZA-8	Z35635	8.2~8.8	0.8~1.3	0.020~0.030	余量	0.065	0.005	0.005	0.002
ZA-12	Z35630	10.8~11.5	0.5~1.2	0.020~0.030	余量	0.065	0.005	0.005	0.002
ZA-27	Z35840	25.5~28.0	2.0~2.5	0.012~0.020	余量	0.072	0.005	0.005	0.002

①UNS 合金代号根据 ASTM E527 命名。　②按算术差确定。　③用于砂型铸造和压铸的锌-铝铸锭可以含有铬、锰或镍，其含量分别达0.01%或总量0.03%。这些元素的上述含量存在未见报道有任何有害影响。所以无需对这些元素进行分析。

表 3.5-5　锌铸造合金的典型力学性能

合金和产品形式①	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		伸长率 50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度 HB	冲击强度		疲劳强度④		弹性模量	
	MPa	ksi	MPa	ksi			J	lbf · ft	MPa	ksi	GPa	10^6psi
No.2(D)	359	52.0	—	—	7	100	47	35	58.6	8.5	85.5	12.4
No.3(D)	283	41	—	—	10	82	58③	43	47.6	6.9	—	—
No.5(D)	331	48	—	—	7	91	65③	48	56.5	8.2	—	—
No.7(D)′	283	41	—	—	13	80	58③	43	—	—	—	—
ZA-8(S)	248~276	36~40	200	29	1~2	80~90	20③	15	—	—	85.5	12.4
ZA-8(P)	221~255	32~37	207	30	1~2	85~90	—	—	51.8	7.5	85.5	12.4
ZA-8(D)	372	54	290	42	6~10	95~110	42③	31	—	—	—	—
ZA-12(S)	276~317	40~46	207	30	1~3	90~105	25③	19	103.5	15	83.0	12.0
ZA-12(P)	310~345	45~50	207	30	1~3	90~105	—	—	—	—	83.0	12.0
ZA-12(D)	400	58	317	46	4~7	95~115	28③	21	—	—	—	—
ZA-27(S)②	400~440	58~64	365	53	3~6	110~120	47③	35	172.5	25	75.2	10.9
ZA-27(P)	421~427	61~62	365	53	1	110~120	—	—	—	—	75.2	10.9
ZA-27(D)	421	61	365	53	1~3	105~125	—	—	—	—	—	—

①D，压力铸造；S，砂型铸造；P，金属型铸造。　②铸造状态。　③无缺口夏比。　④旋转弯曲试验，5×10^8 周。

表 3.5-6　锌铸造合金的典型物理性质

合金	密度① /(g/cm³)	熔点范围		电导率，%IACS	热导率②		线膨胀系数③		比热容④	
		℃	℉		W/(m · K)	Btu/(h · ft)	μm/(m · K)	μin/(in · ℉)	J/(kg · K)	Btu/(lb · ℉)
No.3	6.6	381~387	719~728	27	113	65.3	27.4	15.2	418.7	0.10
No.5	6.6	380~386	717~727	26	108.9	62.9	27.4	15.2	418.7	0.10

（续）

合　金	密度①/(g/cm³)	熔点范围		电导率，%IACS	热导率②		线膨胀系数③		比热容④	
		℃	℉		W/(m·K)	Btu/(h·ft)	μm/(m·K)	μin/(in·℉)	J/(kg·K)	Btu/(lb·℉)
No.7	6.6	381～387	719～728	27	113	65.3	27.4	15.2	418.7	0.10
No.2	6.6	379～390	115～734	25	104.7	60.5	27.8	15.4	418.7	0.10
ZA-8	6.3	375～404	707～759	27.7	114.7	66.3	23.3	12.9	435.4	0.104
ZA-12	6.0	377～432	710～810	28.3	116.1	67.1	24.2	13.4	448	0.107
ZA-27	5.0	376～484	708～903	29.7	125.5	12.5	26.0	14.4	534.4	0.125

①在20℃(68℉)。　②在24℃(75℉)。　③在20～100℃(68212℉)。　④在24～92℃(75～198℉)。

锌铸造合金具有枝晶/共晶的显微组织。亚共晶合金以富锌η枝晶形凝固，而过共晶合金以富铝枝晶形凝固。ZA-8和ZA-12合金以核β枝晶形凝固，而ZA-27以α枝晶形凝固。

特别重要的是所有的锌-铝合金都必须小心处置，以防止在所有的其他元素中混入过多的有害杂质元素如铅、镉、锡和铁。使用曾经熔化过铸造铜和铝合金或铁的炉子而造成的交叉污染尤其会造成麻烦，因为这些合金中含有对锌合金有害的元素。许多国家的生产商出于纯度的考虑，要求在铸造锌合金的生产中只能使用100%的新物料。这个要求在北美并不适用，但是仍希望从外部供应商得到的合金铸锭能符合严格的杂质限制。在生产铸件的过程中，最多允许50%的铸造重熔料进入熔化炉里。

锌合金的熔点低(表3.5-6)，要求提供的热量也相对少，故不要求熔渣或保护气氛，并且无污染；这最后一条是特别重要的优点。锌压铸件所固有的快速冷却速率导致其性能和尺寸随时间而发生的微小变化，尤其当铸件从模具中取出就进行淬火而不是在空气中冷却时。尽管问题不大，但如果要求有严格的尺寸公差，就可以在其使用之前进行稳定化热处理。热处理的温度越高，稳定化所要求的时间就越短；100℃(212℉)是防止铸件发生气孔或其他问题的工艺极限。一种常用的处理是在100℃(212℉)中处理3～6h，然后空气冷却。在温度70℃(158℉)中的处理时间要延长到10～20h。

鉴于其高度的流动性，锌合金可以铸成远远薄于其他压铸合金的壁厚，而且它们能压铸成较小的尺寸公差。锌合金可以采用非常小的起模斜度；在有些情况下，零度起模斜度也是可能的。

No.2合金。在所有亚共晶的锌基压铸(锻)系列(Zamak)的压铸合金中，它具有最高的抗拉强度、抗蠕变强度和硬度。其高含铜量(3.0%Cu)造成某种尺寸的不稳定性，并导致经过20年后的约0.0014%的净膨胀。这还会造成冲击强度和塑性的一些下降。No.2合金具有良好的支承性能。

No.3合金。它是美国应用最为广泛的锌压铸合金。它具有最佳的强度、易铸造性、尺寸稳定性、易精加工性以及成本的整体综合性能。

No.5合金。用于生产硬度和强度均超过No.3合金生产的铸件。然而，这些性能的获得是以牺牲其塑性为代价的，而且成形以后的一些工序，如铆接、冷锻或折弯都必须格外小心。在所有亚共晶锌-铝合金中，合金No.5的抗蠕变性仅次于No.2。

No.7合金。它基本上是一种高纯度型的No.3合金。由于其较低的含镁量，No.7合金具有甚至比No.3合金更好的铸造性，故能在铸件上极好地重现各种表面细节。在所有亚共晶合金中，No.7合金具有最佳塑性。

No.8合金。是除亚共晶合金之外惟一能进行热腔压铸的过共晶合金。在许多方面它等同于No.2，但是ZA-8具有较高的抗拉强度、疲劳强度和蠕变强度，较高的尺寸稳定性以及较低的密度。合金ZA-8铸件易于精加工，故能将其高结构强度与极美的外观结合起来。

合金ZA-12。它在冷腔压铸机里有非常好的铸造性。它的密度低于除ZA-27之外的所有其他锌合金，并且常被规定用于那些必须使铸造质量与其最佳性能相结合的铸件上。ZA-12的电镀质量低于ZA-8，但是它具有极佳的支承性能和耐磨性。

合金ZA-27。它是最轻、最硬和最强的锌合金，但是当用压力铸造时，其塑性和冲击强度相对较低。由于ZA-27有较宽的凝固范围，若不加以注意其铸造质量会受影响。ZA-27的二次蠕变强度好于所有其他的锌合金，除目前使用不多的IKZRO(国际铅锌研究

组织)16 以外；ZA-8 具有较好的初次蠕变强度。合金 ZA-27 还表现出所有锌铸造合金中最好的消声性和减震性，作为一组的锌合金，其在高温下的抗震性等同于铸铁的。

合金 IKZRO 16(Zn-1.25Cu-0.2Ti-0.15Cr)。它的开发是为了专门满足对最佳抗蠕变性的要求，尤其在高温中。它的确具有所有锌合金中最好的抗蠕变性，但是它加工困难，并且有熔化不稳定的缺陷，为此 ZA-8 常用于其适合的场合。

应当指出，锌合金的强度特性随温度的升高而明显降低。在 100℃(212℉)，抗拉强度和屈服强度一般都只有它们在室温中的 65%~75%，并且蠕变性也同样降低。表 3.5-7 所示是温度对锌铸造合金性能的影响。

表 3.5-7　温度对锌合金和锌-铝合金铸件力学性能的影响

合金代号	温度		抗拉强度①		冲击吸收功②		断裂韧度(平均 K_{Ic})			
							压力铸造		砂型铸造	
	℃	℉	MPa	ksi	J	lbf·ft	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
传统压铸合金										
No.2	21	70	359	52.1	47.5	35	—	—	—	—
No.3	-40	-40	308.9	44.8	2.7	2	10.1	9.2		
	-20	-4	301.3	43.8	5.4	4	—	—	—	—
	0	32	284.8	41.3	31.2	23	—	—	—	—
	21	70	282.7	41.0	58.3	43	—	—	—	—
	24	75	—	—	—	—	12.3	11.2	—	—
	40	104	244.8	35.5	57.0	42	—	—	—	—
	95	203	195.1	28.3	54	40	—	—	—	—
No.5	-40	-40	337.2	48.9	2.7	2	—	—	—	—
	-20	-4	340.6	49.4	5.4	4	—	—	—	—
	0	32	333.0	48.3	55.6	41	—	—	—	—
	21	70	328.2	47.6	65.1	48	—	—	—	—
	40	104	295.8	42.9	62.4	46	—	—	—	—
	95	203	242.0	35.1	58.3	43	—	—	—	—
No.7	-40	-40	308.9	44.8	1.4	1.0	—	—	—	—
	-20	-4	299.2	43.4	1.9	1.4	—	—	—	—
	-10	14	—	—	2.4	1.8	—	—	—	—
	0	32	282.7	41.0	3.8	2.8	—	—	—	—
	20	68	—	—	54.2	40	—	—	—	—
	50	122	232.4	33.7	58.3	43	—	—	—	—
	95	203	193.1	28.0	54.2	40	—	—	—	—
	150	302	120.0	17.4	43.4	32	—	—	—	—
锌-铝铸造合金										
ZA-8	-40	-40	409.6	59.4	1	1	10.2	9.3		
	-20	-4	402.7	58.4	1	1	—	—	—	—
	-10	14	—	—	2	1.5	—	—	—	—
	0	32	382.7	55.5	2	1.5	—	—	—	—

（续）

合金代号	温度		抗拉强度①		冲击吸收功②		断裂韧度(平均 K_{Ic})			
							压力铸造		砂型铸造	
	℃	℉	MPa	ksi	J	lbf·ft	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
锌-铝铸造合金										
ZA-8	20	68	373.7	54.2	42	31	—	—	—	—
	24	75	—	—	—	—	12.6	11.5	—	—
	40	104	—	—	54	40	—	—	—	—
	50	122	328.2	47.6	—	—	—	—	—	—
	60	144	—	—	56	41	—	—	—	—
	80	176	—	—	65	48	—	—	—	—
	100	212	224.1	32.5	63	46	27.7	25.2	—	—
ZA-12	-40	-40	450.2	65.3	1.5	1	11.2	10.2	9.8	8.9
	-20	-4	—	—	1.5	1	—	—	—	—
	0	32	434.4	63.0	3	1.7	—	—	—	—
	20	68	403.4	58.5	29	21	—	—	—	—
	24	75	—	—	—	—	14.4	13.1	14.5	13.2
	40	104	—	—	35	26	—	—	—	—
	50	122	349.6	50.7	—	—	—	—	—	—
	60	140	—	—	40	29	—	—	—	—
	80	176	—	—	46	33	—	—	—	—
	100	212	228.9	33.2	46	34	29.0	26.4	29.1	26.5
	150	302	119.3	17.3	—	—	—	—	—	—
ZA-27	-40	-40	520.6	75.5	2	1.5	11.9	10.8	16.4	14.9
	-20	-4	500.6	72.6	3	2.5	—	—	—	—
	-10	14	—	—	7	5	—	—	—	—
	0	32	497.1	72.1	—	—	—	—	—	—
	24	75	—	—	—	—	20.2	18.4	23.7	21.6
	20	68	425.4	61.7	13	9.5	—	—	—	—
	40	104	—	—	15	11	—	—	—	—
	50	122	397.8	57.7	—	—	—	—	—	—
	60	140	—	—	16	12	—	—	—	—
	80	176	—	—	16	12	—	—	—	—
	100	212	259.3	37.6	16	12	35.2	32.0	42.1	38.3
	150	302	129.0	18.7	—	—	—	—	—	—

①铸造状态。　②铸造状态，无缺口6.35mm(0.25in)四方试件。

引自：《锌合金的工程性能》，国际铅锌研究组织，1989和Noranda技术中心。

重力铸件

在20世纪60年代以前，除了成形的压铸合金、薄壳铸造合金以及为轴承而开发应用的特殊合金以外，没有任何一般用途的重力铸锌合金。在20世纪60、70年代里，开发成功一种新的过共晶锌-铝合金。

从1962年开始，首先出现合金ILZRO-12(现在的ZA-12)，很快又有了ZA-8和ZA-27。合金ZA-12首先作为合金No.3压铸件的样品合金而开发成功。合金ZA-27是专门作为砂型铸造合金而开发的，而ZA-8用于金属模铸造合金。所有这三种合金现在都较为广泛地应用于压力铸造。

ZA合金采用重力铸造的性能明显不同于它采用压力铸造的性能。重力铸造合金的成分如表3.5-4所列。与压铸合金有关的杂质、熔化交叉污染和一般处置的要求也同样适用于重力铸造合金。和压铸合金一样，其随时间而发生的显微组织变化能引起铸造零件性能和尺寸的改变。然而，一个零件的性能在其正常寿命跨度里的变化通常是非常小的，而尺寸的变化除ZA-27外也是可忽略不计的。在250℃(482℉)温度下，经12h的稳定化热处理，再通过炉冷，就能消除四分之三的因长期时效所引起的尺寸变化。

合金ZA-8。大都用于铁金属模的铸造，但是它也能使用石墨模。如果需要的话，合金ZA-8还能用砂型铸造，但砂型铸造对这种合金应用得不太多。除了抗蠕变性以外，金属模铸件的强度低于压铸件，这是由于前者较粗的显微组织。ZA-8的电镀质量特别好，其表面细节的重现性比所有其他的ZA合金都强。

合金ZA-12。它的通用性优于ZA-8因为它还能砂型铸造或金属型铸造。其强度性能高而且塑性和冲击强度性能都可接受。显然，石墨铸造也是该合金的一种选择。ZA-12的支承和减震性能也非常高。合金ZA-12还易于为机加工轴套和工业轴承的各种实心和空心圆形零件实现半连续浇铸。

合金ZA-27。合金ZA-27用砂型铸造能获得其最佳性能。然而，若要生产重型截面的铸件，应该注意确保其最大致密度和最小底层收缩。在凝固过程中，由富铝相的重力偏析作用所引起的底层收缩，当液态锌进入铸件时会在铸件滞阻表面上造成粗糙化。使用冷铁可促成其方向性凝固和提高其冷凝速率，从而确保获得减少底层收缩和致密的铸件。通过稀土元素的加入来减少底层收缩也有相关报道。

在一个致密的重力铸件中，ZA-27所形成的塑性和冲击强度远高于许多压铸件所具有的。合金ZA-27具有极佳的轴承和耐磨性能，而且它展现了锌合金中最好的减震性。虽然对此很少有要求，但是通过一种在320℃(608℉)温度中处置3h再炉冷的简单热处理，就能提高ZA-27铸件的塑性和冲击强度。而通过一种250℃(482℉)温度中处置12h再炉冷的稳定化热处理，则可以增强其尺寸稳定性。

模具用锌合金(Kirksite)。它作为一种成形模具合金得到应用，它能通过砂型铸造而快速成形。它具有几乎与No.2模具铸造合金完全一样的成分。它主要用于构成铸造型的两片模，用以生产成形金属薄板零件，如用于运输和航空工业上用的零件。Kayem 1和Kayem 2是两种在欧洲广泛使用的类似合金。用Kirksite制成的铸造尺寸到位的模具目前用于塑料注塑模，应用于少量的样件和生产操作。ASTM B793涵盖了两种成形模具(表3.5-8)。

表3.5-8 用于金属薄板成形模具和铸锭形的中空铸件的锌铸造合金常规成分

合金		化学成分(质量分数,%)							
通用代号	UNS编号	Al	Cd最大	Co	Fe最大	Pb最大	Mg	Sn最大	Zn
成形模具合金(ASTM B793)									
合金A	Z35543	3.5~4.5	0.005	2.5~3.5	0.100	0.007	0.02~0.10	0.005	余量
合金B	Z35542	3.9~4.3	0.003	2.5~2.9	0.075	0.003	0.02~0.05	0.001	余量
中空铸件合金(ASTM B792)									
合金A	Z34510	4.50~5.00	0.005	0.2.3	0.100	0.007	—	0.005	余量
合金B	Z30500	5.25~5.75	0.005	0.1最大	0.100	0.007	—	0.005	余量

中空铸造合金。它广泛用于中空铸件的生产，如台灯底座。将熔化的金属浇铸进入铸型，直至铸型被倒满或接近满，然后将铸型翻转，使尚未凝固的金属(金属液)倒出。最后将留下的已凝固壳体取出。壳体的厚度取决于浇铸与铸型翻转之间的时间间隔、熔化金属与铸型的温度以及铸型的材料。现在有两种铸造合金可供使用(表3.5-8)。

特种合金。在欧洲，主金属(Main Metal)合金和铝铜锌(Alzen)合金仍用于生产连续铸造的轴承毛坯。它们还应用于滑移元件、液压部件、蜗轮、滚子轴承

的保持架以及多种其他产品。日本开发成功的 Cosmal 系列合金，其配方专用于要求高减震的用途。

铸造产品的应用

锌在交通运输业中广泛应用于如化油器、燃油泵体、刮水器、路码表壳、格栅、喇叭、变速杆、承载变速器、加热器元件、制动零件、收音机壳、电子散热元件、车灯和仪器的罩盖、转向机轮毂、交流发电机支架、内外饰硬件以及仪表板及表体模压制件的零件上。美国制造的乘用车平均每辆有 17lb(7.7kg)的压铸件。锌铸件还广泛应用于一般的硬件以及所有各种的电子、电器附件，包括家用电器(如洗衣机、吸尘器、搅拌机等)、燃油炉、电动机机座、锁和钟。锌铸件经常并越来越多地被规定用于计算机工业，办公设备(复印机、传真机、现金出纳机和打字机)，还有如记录仪、投影仪、自动售货机、照相机、汽油泵和许多手动工具的一些用途，还有如较为大型的钻床和车床。ZA 合金还越来越多地被规定用于低速和高载用途的轴承和轴瓦里。

锌合金铸件的精加工和二次加工工序

表面工程。许多用于其他类型的金属产品的精加工，都能用于锌的压铸件和重力铸件。适用的精加工处理包括：

- 机械抛光、研磨、刷光和滚光。
- 镀覆，所用材料如铜、镍、银和黑镍、铬、化学镀镍和黄铜。
- 化学精加工如铬酸盐处理、搪瓷、蜡克、油漆、涂清漆、阳极化处理和真空镀铝。
- 塑料(粉末涂层)精加工。

铸造表面的磷化和铬酸盐处理一般推荐为后续油漆或粉末涂层提供良好的粘附性。

虽然锌具有良好的天然耐腐蚀性(只要不超过其杂质极限)，但铬酸盐处理和阳极化仍能在中等至严重腐蚀性环境应用中增加其耐腐蚀保护性。储存于潮湿环境中的锌铸件上会形成白锈，这可以通过表面的铬酸盐处理得到有效的防止或延缓。有关锌的腐蚀特征将在下面进一步阐述。

切削加工。所有锌铸造合金都有优异的切削特性，即长刀具寿命、低切削力、低表面粗糙度、低刀具磨损和生成小切屑。这些通用的合金切削工序包括钻削、攻螺纹、铰孔、拉削键槽、车削、铣削、板牙套丝和锯割。

连接。锌合金铸件可以用软钎焊、硬钎焊或使用锌基焊料的某些焊接技术进行传统的连接。不推荐使用镉、锡或铅基的软钎焊，因为它们会引发晶间腐蚀的问题发生，除非在进行软钎焊以前先镀上很厚的镍或铜的镀层。更新的锌基软钎焊也正在推广应用。

粘结或机械紧固也是连接铸件的极好方法。锌铸件可以铆钉连接、销钉连接和折边连接。螺纹连接包括自攻螺钉都不能拧得过紧而是要按规定扭矩拧紧。设计中应考虑到，当达到50℃(122℉)或更高的温度时，会丧失高达40%的扭矩损失。采用专用的紧固件可以避免明显的扭矩损失，包括尺寸合适的锥形(弹簧或贝氏即 Belleville)或星形垫圈。通过压铸焊将零件正确对齐并使其连接，以此能完成两件或更多零件的连接。

锻压锌和锻压锌合金

作为锻压产品应用的纯锌或添加有少量合金元素的锌合金主要有三类：平轧产品、拉制线材产品以及挤压和锻造产品。锻压锌易于切削、连接和精加工。

平轧产品

轧制锌。锌通常铸成 25～100mm(1.0～4.0in)厚的扁锭，它们适合轧制；先将其预热，然后进行粗轧和精轧。锌带的精轧工艺规范随产品要求而改变。其带材按宽至 2m(79in)和厚度薄至 0.1mm(0.004in)的不同规格生产。厚度 0.025mm(0.001in)或更小的箔材用特殊的轧机生产。对于光亮表面并有高塑性的，要在 120～150℃(250～300℉)的温度中进行精轧。

借助弯曲、拉丝、深拉、辊轧、压型和冲击挤压，轧制锌能容易地成形为许多不同的型材。借助软钎焊和电阻焊将它们进行连接也很容易。含有铜和钛的锌合金薄板，具有非常高的抗蠕变性，故能应用于功能性用途，例子包括如屋面和侧面的建筑用途。轧制锌的生产有七种基础合金，此外还有纯锌(表3.5-9)。化学成分和轧制条件的不同能形成不同的性能。表3.5-10 列出了轧制锌的典型力学性能。

超塑性锌。含有 21%～23% Al 和少量的铜(0.4%～0.6%)的超塑性锌能容易地加工成复杂的形状，并在 250～270℃(480～520℉)的温度下展现塑料和熔融玻璃的特性。超塑性锌通过在 275～375℃(525～705℉)的温度下处理后，再进行淬火和时效而形成的非常细的晶粒大小能使其性能均匀一致。不同牌号如经空冷或炉冷的超塑性锌，具有不同大小的强度(典型的力学性能在表3.5-11 中所列)。当超塑性锌再加热到275℃(527℉)以上，并缓慢冷却到室温时，

其超塑性消失。

表 3.5-9　按 ASTM B69 轧制锌的名义化学成分

合金		化学成分(质量分数,%)						
通用牌号	UNS 编号	Cu	Pb	Cd	Fe 最大	Al 最大	其他(最大)	Zn
Zn-0.08Pb	Z21210	0.001 最大	0.10 最大	0.005 最大	0.012	0.001	0.001Sn	余量
Zn-0.06Pb-0.06Cd	Z21220	0.005 最大	0.05～0.10	0.05～0.08	0.012	0.001	0.001Sn	余量
Zn-0.3Pb-0.3Cd	Z21540	0.005 最大	0.25～0.50	0.25～0.45	0.002	0.001	0.001Sn	余量
Zn-1Cu	Z44330	0.85～1.25	0.10 最大	0.005 最大	0.012	0.001	0.001Sn	余量
Zn-1Cu-0.010Mg	Z45330	0.85～1.25	0.15 最大	0.04 最大	0.015	0.001	0.006～0.016Mg 0.001Sn	余量
Zn-0.8Cu-0.15Ti	Z41320	0.50～1.50	0.10 最大	0.05 最大	0.012	0.001	0.12～0.50Ti 0.001Sn	余量
Zn-0.8Cu	Z40330	0.70～0.90	0.02 最大	0.02 最大	0.01	0.005	0.02Ti	余量

表 3.5-10　轧制锌的典型力学性能

合金	状态	抗拉强度		伸长率(%)	硬度 HB
		MPa	ksi		
Zn-0.08Pb	热轧	134～159	19.5～23.0	65～50	38
	冷轧	145～186	21.0～27.0	50～40	—
Zn-0.06Pb-0.06Cd	热轧	150～170	21.0～25.0	52～30	43
	冷轧	150～200	22.0～29.0	40～30	—
Zn-0.3Pb-0.3Cd	热轧	160～200	23.0～29.0	50～32	47
	冷轧	170～210	25.0～31.0	45～28	—
Zn-1Cu	热轧	170～210	24.0～30.0	50～35	52
	冷轧	210～280	31.0～40.0	40～25	60
Zn-1Cu-0.010Mg	热轧	200～276	29～40	20～10	61
	冷轧	248～317	36～46	25～10	80
Zn-0.8Cu-0.15Ti	热轧	221～290	32～42	38～21	—
	冷轧	200～260	29～37	60～44	—
Zn-0.8Cu	热轧	170～210	24～30	50～35	52

引自：ASTM B69。

表 3.5-11　超塑性 Zn-22Al 合金的典型力学性能

状态	抗拉强度		屈服强度		伸长率(%)	硬度 HB
	MPa	ksi	MPa	ksi		
轧制后	310～380	45～55	255～297	37～43	27～25	70～79
经退火①	400～441	58～64	352～386	51～56	11～9	84～85

①315℃(600℉)退火，空冷。

拉制线材产品

锌容易轧制或挤压成为圆棒，然后再拉制成为线材。锌合金线材通常紧随铸造、轧制和拉制的工序进行连续制造。拉制后有时使用特殊精加工和润滑剂。线材的尺寸从 1.0～6.35mm(0.004～0.25in)。

锌合金线材广泛用于热喷涂或金属喷涂，即将金属线熔化并使用专用喷枪将其喷涂于基材上。这种工

艺主要用于钢的腐蚀保护。除纯锌外，含有15% Al的锌合金也用于热喷涂，因为锌-铝合金能提供更多的耐腐蚀保护。除了这种热喷涂应用以外，锌合金线材还用于钉子和螺钉的生产，以及锌基软钎焊。

锻压和挤压产品

锻造件。目前商业应用的有两种锌的锻造合金，一种是锌-铝基的，另一种含有铜和钛。克洛伊(Korloy)2573(Zn-14.5Al-0.02Mg-0.75Cu)具有低温下的高冲击强度。含钛合金克洛伊(Korloy)3130(Zn-1.0Cu-0.1Ti)是更为一般使用的合金，并有较好的抗蠕变强度。这两种合金均有优异的切削、连接和精加工的特性，虽然含钛合金最好用硬质合金刀头的刀具进行切削。

挤压件。锌合金一般都能进行挤压加工，但是与其他非铁金属相比，它要求较高的压力和较低的速度。将合金ZA-27的连铸坯制成生产轴瓦的挤压毛坯。经挤压的合金ZA-27的拉伸性能比其铸造毛坯的大为改善，特别是塑性。挤压能够为零件提供少切削或无切削的近净成形。锌合金的挤压所要求的温度范围为250～300℃(480～570℉)。

锻压产品的应用

锻压锌除了用于屋面和围板之外，轧制锌还能拉制成许多不同的产品，包括干电池外壳、面糊杯、扶栏、锁眼、仪表外壳、皮带环扣、金属箍、垫片和电器元件如灯泡上的零件。表3.5-12列出不同级别锻压锌的典型终端应用例子。

表3.5-12 锻压锌及其锌合金的典型用途

合 金	应 用
纯锌	深拉器件，金属网
Zn-Cu	建筑结构材料、深拉硬件、货币
Zn-Cu-Ti	屋面、排水沟和落水管，建筑结构材料，深拉硬件，地址标牌，太阳能聚集器
Zn-Pb-Cd-Fe	建筑结构材料、干电池外壳、深拉硬件，地址标牌，电气器件
Zn-Al(超塑性锌)	成形零件例如打字机铸件、计算机面板和机盖

引自：锌合金工程性能，国际铅锌研究组织，1989。

锌的耐腐蚀性

大气腐蚀

在全世界范围里，都已通过试验对锌和锌镀层在大气暴露过程中的特性进行了严密的检测，故可以在合理范围里预测在特定大气环境中锌的性能。

精确地比较在各种大气里的腐蚀特性是很复杂的，因为这涉及许多因素，例如主风方向、腐蚀性气体的种类和密度、海水浪花的量，以及潮湿或冷凝和干燥的相对期。然而锌的腐蚀率很低，其范围从干燥的乡村大气的0.13μm/a(0.005mil/a)到潮湿的工业大气的0.013mm/a(0.5mil/a)，都还是可以接受的。在大多数的天然大气中，锌比钢更耐腐蚀，作为例外的是，钢和锌的腐蚀性都特别低的户内通风气氛和某些高腐蚀性的工业气氛。例如在海边的大气中，锌的腐蚀率大约为钢的1/25。

锌之所以具有高度的耐腐蚀性，是因为能形成不溶性的碱性碳酸盐膜。干扰这种膜形成的环境条件会快速侵蚀锌。控制这种锌在大气暴露所发生腐蚀的速度的最重要因素为：

- 接触潮湿的持续时间和频率；
- 表面干燥的速度；
- 大气的工业化污染的程度。

后者是最为重要的，因为当锌受到酸性潮湿的侵蚀时，其碱性防腐蚀膜的形成就要受到阻碍。例如：2oz/ft^2(610g/m^2)的锌镀层在高度工业化的环境中，经过4年即开始出现锈蚀，而经过10年要锈掉80%的例子就足以说明工业化污染的这种影响。可以预期一种相似的镀层，在乡村大气中暴露经过30～40年或在海洋性大气中15～25年也不会显示锈蚀。

在干燥的大气中，锌会遭受大气氧的缓慢侵蚀。在锌的表面会生成一种薄的、致密的氧化层，在其上面再生成一种疏松的外层。虽然该外层偶尔会遭到破坏，但下面的薄膜能继续保持，并通过限制它与氧气的相互作用而使金属得到保护。在内陆热带气候所具有的这些条件下，锌氧化得非常缓慢。

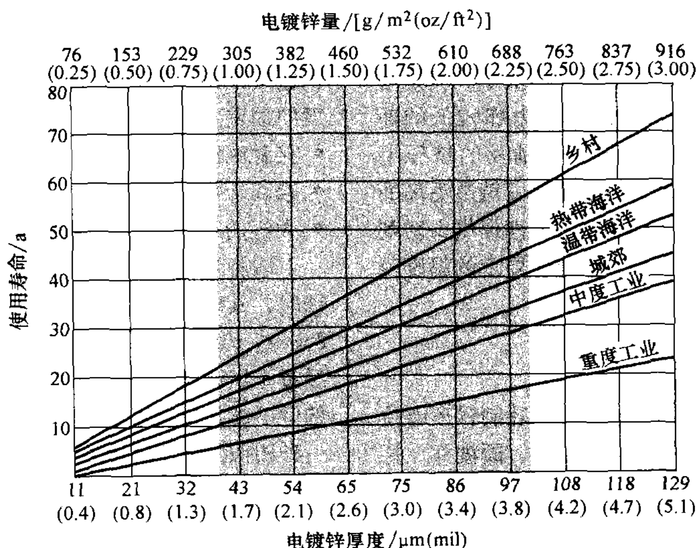
干燥的速度也是一个重要因素，因为具有氧浓度较高的潮湿薄膜会催生腐蚀的发生。在正常的暴露条件下，薄膜干燥得很快，只有在一些封闭的地区由于其干燥时间足够地减慢，才会使锌发生明显的加速侵蚀。

在海边和工业化地区，空气被含有大量可溶性盐的水分所污染。氯化钠($NaCl$)当然是存在于海洋性大气中的主要盐分，硫的氧化物是工业化和都市大气中最为重要的污染。硫的氧化物溶解于水会生成硫酸(H_2SO_4)，硫酸又转而与形成在表面的氢氧化锌($Zn(OH)_2$)或碳酸锌($ZnCO_3$)发生反应产生硫酸锌($ZnSO_4$)。因为这种盐易于溶解，故很容易被雨水冲走，从而留下相对没有得到保护的锌表面。锌腐蚀物的这种溶解性是在工业化大气中影响锌腐蚀速度的最

重要的影响因素之一，这就说明为什么其腐蚀速度根据其含硫量的多少，可以比乡村或海洋大气里的腐蚀速度高出4~5倍。

如果一块裸露的锌表面遇到大量的露珠，如将它储藏在一个温度会周期性变化的封闭空间里其表面就会遭受水滴中所溶解氧的侵蚀。这种水滴还有轻微的导电性，并且因为水滴外缘的氧浓度大于其中心，而导致某种电化学作用。因此，在表面形成大片的疏松氧化锌(ZnO)或$Zn(OH)_2$的沉积，以此取代原来覆盖在整个表面上的保护层。这种氧化物会迅速吸收二氧化碳(CO_2)生成一种碱性碳酸盐即普通所谓的湿储藏锈蚀。它也会在任何新的锌表面上生成，除非注意先将金属储藏在干燥、通风的地方，直到在其整个表面的保护层都形成为止，也可以通过简单的铬酸盐处理来防止湿储藏锈蚀的产生。

镀锌钢的大气暴露试验。图3.5-1所示是户外大气暴露试验的结果，该试验用于检测镀锌层在不同大气环境中的保护寿命。其试验场所选择有代表性的各种主要的类型环境：重度工业化、中度工业化(都市)、城郊、乡村和海洋性的。如图所示，热浸镀镀层在乡村中有最长的寿命期望值，那里的二氧化硫和其他工业化污染的浓度很低。



大　气	描　述
重度工业化大气	其大气含有一般的工业排放如含硫气体、腐蚀性雾汽和由化工厂和炼油厂散发的烟尘。在有剧烈工业活动的地方常发现有最为严重的腐蚀条件，在那里的镀层往往被雨、雪和其他形式的冷凝水所湿润。这些地方的硫化合物能与大气中的潮湿相结合，并将正常的粘结剂和不溶性碳酸锌转变成为亚硫酸锌和硫酸锌。这些硫的化合物都是溶解于水的，并且在锌表面的粘附性很差。它们相对容易地被雨水冲去，使新鲜锌表面暴露在新的腐蚀中。一般，锌暴露在这类环境里的损耗要比在任何其他大气环境里严重得多。还有，若钢在这种环境中用锌保护，其腐蚀则要比使用裸钢慢得多
中度工业化大气	这些类似于重度工业化的环境，从腐蚀的观点来看不太有侵蚀性。在空气中的排放量比重度工业化的环境要低一些，和/或这种排放的侵蚀性也更轻。大部分的都市或城镇地区都属于中度工业化大气
城郊大气	这种大气的腐蚀性一般比中度工业化大气又要弱一些，顾名思义，大多在住宅区、都市或城镇周边的社区
温带海洋大气	在海洋环境中，电镀锌层的使用寿命长度受离开海岸线的远近程度和主风的方向和强度的影响。在海洋性空气中，来自海水浪花的氯化物会与正常防护的、初始腐蚀产物发生反应生成可溶性氯化锌。当这些氯化物被冲刷掉时，新鲜的锌又被腐蚀。尽管如此，温带海洋大气的腐蚀性通常比城郊大气的还要轻一些
热带海洋大气	这种环境类似于温带海洋大气，除非它们的气候更暖和。也可能因为许多热带地区离重度工业化大气甚至中度工业化大气相对更远，所以热带海洋气候的腐蚀性比温带海洋气候的更弱一些
乡村大气	这种大气的腐蚀性是六种大气中最轻的。这主要是由于在这种大气中有相对较低的硫和其他排放

图3.5-1　在所选的大气中，相对于镀锌厚度的使用寿命(达到5%的钢锈蚀表面的时间)。图中阴影部分表示为全部牌号、等级的按其最小厚度的厚度范围，试验按ASTM A123和A153。引自：参考文献[1]

锌压铸件的大气暴露试验。ASTM 通过一项长达20年的项目，对锌压铸件在不同自然大气中的腐蚀性状进行了调查（参考文献[2]）。由于力学性能对压铸件的实际应用有着重要的影响，故将这些性能的变化并不是重量损耗作为腐蚀损坏的一种度量。

表3.5-13所列表明，AC41A 和 AG40A 的冲击强度在工业化大气中暴露的10~20年中有很大的下降。这种力学性能的下降可能是由于晶间腐蚀造成的，压铸合金常对此非常敏感。晶间侵蚀能减小横截面面积，并形成使应力增大的缺口，但是它的整个试件的尺寸并没有明显减小。

表3.5-13　锌压铸件力学性能在若干自然大气中的变化

试验结果根据以下地区的20年暴露试验得到的：户外/工业化（纽约，NY，和 Altoona，PA），户外/乡村（州立学院，PA）和户内。

性　能	原来的值	经历20年的暴露①					
		户外/工业化		户外/乡村		户　内	
AC41A							
抗拉强度/MPa(ksi)	305(44.3)	211(30.6)	[-31%]	259(37.6)	[-15%]	254(36.9)	[-17%]
50mm(2in)长的伸长率(%)	7	3.7	[-50%]	9	[+28%]	12	[+71%]
硬度 HRE	91	78	[-14%]	80	[-10%]	83	[-8%]
夏比冲击吸收功/J(lbf·ft)	56(41)	12(9)	[-78%]②	45(33)	[-20%]	27(20)	[-52%]②
AG40A							
抗拉强度/MPa(ksi)	254(36.9)	206(29.9)	[-19%]	225(32.6)	[-12%]	228(33.1)	[-10%]
50mm(2in)长的伸长率(%)	15	7	[-47%]	18	[+20%]	21	[+40%]
硬度 HRE	83	72	[-13%]	67	[-19%]	74	[-11%]
夏比冲击吸收功/J(lbf·ft)	53(39)	16(12)	[-69%]	51(38)	[-3%]	40(29)	[+3%]

①方括号里的数值为因暴露而造成原来值的变化百分数。　②在10~20年间暴露的大变化。

锌在水中的腐蚀

就像在大气的空气中，锌在天然水中的腐蚀速度小于铁在相应的条件下的速度。因此，锌的镀层大量应用于与水的接触。

锌在水中的腐蚀很大程度上受制于水里所存在的杂质。天然形成的水很少是纯净的。即使作为天然蒸馏的雨水也含有氮、氧、CO_2 和其他气体，此外还带有尘土和烟雾颗粒。流经地面的水更携带着受冲蚀的土壤、腐败的植物、微生物、溶解盐以及胶体和悬浮的物质。渗漏经过土壤的水含有溶解 CO_2 并变为酸性。地面水还含有钙、镁、铁和锰的盐类。海水里除了其高含量的 NaCl 外，还有许多的上述盐类。

在天然水中，所有这些外来物质都会影响金属表面上所形成的膜和腐蚀生成物的结构和成分，这些反过来又制约锌的腐蚀。除了这些物质外，还有如 pH、暴露的时间、温度、运动和流体的搅动都会影响锌在水中的腐蚀。

如同在大气中一样，锌镀层在水中的耐腐蚀性取决于它通过与环境的反应而形成保护层的初始能力。在蒸馏水中，由于无法形成保护性表皮用以减少氧与锌表面的接触，而使发生的侵蚀比含有某种能生成表皮盐类的大多数生活用水和河水更加严重。

水生成表皮的能力主要取决于三个因素：氢离子浓度（pH 值），总含钙量和总碱度。如果 pH 值低于水能与碳酸钙（$CaCO_3$）保持平衡的 pH 值，则水将有利于外皮的溶解而不利于它的沉积。有着高含量的游离 CO_2 的水也易于使锌发生侵蚀。

水的硬度也是锌腐蚀的一个重要变量。锌在硬水中的腐蚀速度可以为 15μm/a（0.6mil/a），但是在软水里它能达到 150μm/a（6mil/a）。硬水通常不太腐蚀锌，是因为它们能在金属表面沉积成保护性外皮，而软水将不会沉积这种外皮。类似地，海水也会在锌表面沉积保护皮，故其腐蚀性也比软水低。

有着较高溶解氧和 CO_2 含量的软水，对锌的腐蚀性一般比很硬的水更强烈。还发现在河水比在井水更容易沉积外皮。通常在水里形成的腐蚀物为 $ZnCO_3$。

温度的影响。在实际中的应用已经表明，温度是影响锌在水中腐蚀的一个非常重要的因素。通过一项

研究发现在温度约60℃(140℉)时，腐蚀的速度有显著的提高，接着在更高的温度下又有所降低(参考文献[3])。当温度接近70℃(160℉)时，电势发生逆转，此时锌镀层变为铁的阴极。低氧和高碳酸氢盐有助于这种逆转，但是氧、硫酸盐和氯酸盐的存在都促使锌维持天然阳极的状态。

这个研究结果是99.9%的纯锌浸没于充气蒸馏水中15天并以56r/min转速旋转才得到的。借助气泡在水里的通过，使水不断地得到充气。另外，试件支承一个木制圆盘上以56r/min转速在试验的水里旋转。

表3.5-14列出金属的损耗和侵入量，并描述了锌表面上的腐蚀生成物外观。在腐蚀膜的特性与腐蚀程度之间有一种直接的关系。在腐蚀达到最大时的温度下，这种膜呈现为晶粒状和无粘附性的，但是在较低的温度下，它是呈胶状和粘附性的。在较高的温度下，它成为致密和有粘附性的。由此能得出结论，晶状镀层更容易为氧所渗透，这也就说明了腐蚀会因此增加。

表3.5-14　温度对锌在蒸馏水中腐蚀的影响

将轧制的高级别锌浸没于有气泡通入的水中。

温度		腐蚀速度		腐蚀膜外观
℃	℉	$mg/dm^2/d$	mil/a	
20	68	3.9	0.78	胶状的，非常粘性的
50	122	13.7	2.74	较少胶状的，有粘性的
55	131	76.2	15.2	大多晶粒状，无粘性的
65	149	577.0	115.4	从晶粒状到片状，无粘性的
75	167	460.0	92.0	晶粒状，片状，无粘性的
95	203	58.7	11.7	密实，致密，无粘性的
100	212	23.5	4.7	非常密实和有粘性的

锌在土壤中的腐蚀

镀锌钢在土壤中的腐蚀速度及其性能是因其所处于的土壤种类而不同的。土壤的成分可以有很大的不同，并可以含有约束性和非约束性的盐、有机化合物、风化物、细菌和其他微生物、可溶性气体(如氢、氧和甲烷)、酸和碱。土壤的透气性随土壤的结构而不一样。虽然土壤中氧的浓度低于空气中的，但还是属于比较高的。土壤之间的差别很大，故其腐蚀状态也很复杂。

一般来说，粗糙、结构通畅的土壤通常透气性也好，故可以料想镀锌钢在里面的性能也与在空气中的差不多。在组织结构细腻并含水能力高的土壤如粘土和泥沙基的土壤里，其腐蚀速度也可能比较高。

土壤的电阻率被认为是一种预测其腐蚀率的可靠方法。高电阻(低电导)土壤的腐蚀性比低电阻(高电导)的要弱一些。干土壤是弱导体，对锌的腐蚀性也最弱。

锌在化学物质中的腐蚀

一般都认为，锌在如化学工艺流程中所遇到的酸或强碱介质中是不能使用的。锌的腐蚀性在化学水溶液的pH值为6~12之外的两侧时，都要增大。

浓度非常稀释的酸会加速其腐蚀速度以致超过其使用的限度。中等强度的碱溶液比相应浓度酸的腐蚀性要弱很多。但还是会产生足够的腐蚀性妨碍其使用。

无水腐蚀

有机化合物。pH值接近中性和实际无水的许多有机液体都不侵蚀锌。因此，锌和镀锌产品通常都能用于汽油、甘油和防腐蚀的三氯乙烯。

气体。锌在使用中如果没有水存在的话可以在正常温度下安全地与最常用的气体相接触。潮湿程度会促使侵蚀的发生。

食品。锌不应该与酸性食物接触，除非它们预计能保持干燥。要不然，锌必须适当地采用铜-镍-铬镀层或用其他可令人满意的防渗透涂层进行保护。在许多食物里，所存在的稀酸性都能侵蚀锌，并且会给食物带上金属味。表3.5-15概括地列出了未经处理的锌与不同介质的兼容性。

表3.5-15　未经处理的锌与不同介质的兼容性

介质	介质描述	兼容性
气溶胶喷射剂	—	优
酸性溶液	弱，冷，静止的	一般
	强	不作推荐
醇类	无水	好
	水混合物	不作推荐
	饮料	不作推荐
碱性溶液	达到pH12.5	一般
	强	不作推荐
四氯化碳	—	优
清洁溶剂	含氯氟烃(Chlorofluorocarbon)	优
清洁剂	防腐蚀的	好

（续）

介质	介质描述	兼容性	介质	介质描述	兼容性
柴油	无硫	优	润滑剂	矿物的，无酸	优
燃油	无硫	优		有机的	不作推荐
煤气[①]	城市、天然、丙烷、丁烷(液化气)	优	石蜡	—	优
			全氯乙烯	—	优
甘油	—	优	石油[①]	—	优
墨水	印刷用	优	深冷剂	含氯氟烃(Chlorofluorocarbon)	优
	水剂书写用	不作推荐	肥皂	—	好
杀虫剂	干	优	三氯乙烯	—	优
	溶解的	不作推荐			

①因为可能有潮湿痕迹的存在，建议用铬酸盐钝化处理。

以锌阳极进行阴极保护

如果一种需要保护的结构没有或无法用锌电镀，还是可以借助于锌作为一种处于阴极保护系统里的牺牲电镀阳极对其腐蚀进行控制的。

在如盐水、淡水和大多数土壤的各种介质中的阴极保护是有效的。采用阴极方法保护最多的结构就是地下管线和和船舰壳体。阴极保护电流的来源可以是外加电源(检波交流电或专门产生的直流电)或电镀电源的。

当一个金属表面与电解液接触时，就会在其表面上分别相应于各自的电化学反应性的不同局部区域之间产生电位差。反应性较强(即惰性弱)的区域相对于反应性较弱(即惰性强或“阴极的”)称为“阳极”。这种区域间的电位差造成电流通过金属从阴极流向阳极，再通过电解液从阳极到阴极，由此构成电流回路。在电流进入电解液之处(即阳极)，金属离子进入溶液，导致阳极发生腐蚀。

如果用导线或圆棒将金属(例如钢)与同样跟电解液相接触的锌进行电连接，上述腐蚀就能防止发生并使金属得到保护。在这种情况下，电流从外部锌阳极通过电解液流向钢的表面，而且这个电流的大小足以对钢进行阴极保护。锌阳极正常情况下要符合ASTM(B418)或政府(MIL-A-18001H)的技术规范。表3.5-16列出了在阴极保护系统中锌阳极的成分要求。

表3.5-16 在海水中使用(种类Ⅰ)和高温中暴露(种类Ⅱ)的锌阳极化学成分技术标准

阳极种类	UNS编号	化学成分(质量分数,%)						
		Al	Cd	Fe最大	Pb最大	Cu最大	其他元素(总量)	Zn
种类Ⅰ	Z32120	0.1~0.5	0.025~0.07	0.005	0.006	0.005	0.1	余量
种类Ⅱ[①]	Z13000	0.005最大	0.003最大	0.0014	0.003	0.002	—	余量

①用于温度高于大约50℃(120℉)时，防止晶间腐蚀的发生。

引自：ASTM B418。

参考文献

[1] *Hot Dip Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Products,* American Galvanizers Association, 1989.

[2] Report of Subcommittee V on Atmospheric Exposure Tests of Zinc Alloy Die Castings, Committee B-6, *Proceedings ASTM,* Vol 61, ASTM, 1961, p 273–281.

[3] G.L. Cox, Effect of Temperature on the Corrosion of Zinc, *Ind. Eng. Chem.,* Vol 23, 1931, p 902–904.

精选参考文献

- R.J. Barnhurst, Zinc and Zinc Alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 527–542.
- *Designing in Zinc,* International Lead Zinc Research Organization, 1982.
- *Engineering Properties of Zinc Alloys,* 3rd ed., Interna-

tional Lead Zinc Research Organization, 1988.

- S.G. Fountoulakis, Continuous Electrodeposited Coatings for Steel Strip, *Surface Engineering*, Vol 5, *ASM Handbook*, 1994, p 349–359.
- D.C.H. Nevison, Corrosion of Zinc, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, 1987, p 755–769.
- D.C.H. Nevison, Zinc and Zinc Alloys, *Casting*, Vol 15, *ASM Handbook*, ASM International, 1988, p 786–797.
- F. Porter, *Zinc Handbook: Properties, Processing, and Use in Design*, International Lead Zinc Research Organization, 1991.
- G.J. Slunder and W.K. Boyd, *Zinc: Its Corrosion Resistance*, International Lead Zinc Research Organization, 1983.
- A.J. Stavros and J.W. Gambrell, Hot Dip Coatings, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, 1987; p 432–445.
- H.E. Townsend, Continuous Hot Dip Coatings, *Surface Engineering*, Vol 5, *ASM Handbook*, 1994, p 339–348.
- D. Wetzel, Batch Hot Dip Galvanized Coatings, *Surface Engineering*, Vol 5, *ASM Handbook*, 1994, p 360–371.
- *Zinc Alloy Castings: Product Design and Development*, International Lead Zinc Research Organization, 1993.
- *Zinc Chemicals*, 2nd ed., International Lead Zinc Research Organization, 1983.
- *Zinc Dust and Powder*, International Lead Zinc Research Organization, 1982.
- *Zinc Oxide: Properties and Applications*, International Lead Zinc Research Organization, 1978.

第6章 锡和锡合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，517~526页。其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

锡是一种软、亮白色和低熔点的金属，它以钢的镀层形式即镀锡钢板为特征，并以此广为著称。其熔化状态能与大多数普通金属及其合金发生反应，并易于将它们湿润。因为其低强度，它多以纯金属、并不作为结构材料、也很少以整块的形式被应用。故而，这种金属最常见的是用于其他金属及其合金的镀层，起到耐腐蚀、改善外观和提高焊接性的作用。它还在合金中有广泛的应用，其中最重要的是锡基软钎焊料、轴承合金和铜基青铜。

锡的生产

锡是用初级和二级的两种原料生产的。再生锡是利用再生材料生产的（见本书中“回收和循环使用寿命分析”一章所述）。

初级生产。锡矿一般都集中在离消费中心距离很远的地区。主要锡生产国（不包括前苏联和中国）为（以递减为序）：巴西、印度尼西亚、马来西亚、泰国、玻利维亚和澳大利亚。这些国家的产量超过全世界的85%。

锡石（二氧化锡）是一种天然形成的氧化锡，它是非常经济的重要锡矿石。世界上锡矿石的主体是从低品位的锡石矿藏中获得的，而这种矿藏又是来源于原始矿体或与花岗岩或花岗岩成分的岩石有关的矿脉。

原始矿藏只含有百分比非常低（例如0.01%）的锡，故必须通过处理大量的土壤或岩石才能获取足够可提取的锡矿。不像其他金属的矿石，锡石非常不容易被化学风化或机械风化，但是原始矿脉由于空气和水的持续冲蚀，作为残积和冲积矿床而形成的矿藏。

在地下矿脉中的锡矿藏，通过打竖井和挖横向坑道进行挖掘，并通过在工作面上的钻掘和爆破对岩石进行破碎。再通过挖掘、砂砾的泵取和水力冲挖将残积矿床和冲积矿床上的锡石开采出来。在露天矿里，采用一种不太应用的方法，即机械和人工的方法将含锡的材料运出。矿石经过球磨富集后，最后的选矿在选矿场进行。

最终含有70%~77%的精选矿送往熔化厂，在那里与无烟煤和石灰石混合。然后将炉料装进反射炉里加热到约1400℃（2550℉），将氧化锡还原成不够纯净的金属锡，然后把金属置于巨大的铸铁坩埚中加热、精炼。再将蒸汽或压缩空气通入熔化金属，经过这样的处理并添加能与杂质结合的、数量受控制的其他元素，从而使之成为高纯度（99.75%~99.85%）的锡。这种高纯度锡通常要再经过熔化或电解的处理，最后纯度可以接近99.99%。

经过熔炼锡被铸成质量为12~25kg（26~56lbf）的锭块或质量为1kg（2lb）及以上的棒料。锡通常是按照牌号名称出售，牌号的选择大都根据杂质含量来决定，而杂质含量就是各种终端产品所允许的。锡的高纯度牌号可以含有少量的铅、锑、铜、砷、铁、铋、镍、钴和银。工业纯锡的总不纯度很少超过0.25%。

镀锡

镀锡钢板。锡在全世界最大的单独用途就是用于制造镀锡钢板（镀锡薄的钢板），其占有世界总消耗量的约40%。自从1940年以来，用于镀锡钢板的传统热浸镀方法已经很大部分为连续轧制钢带上的电沉积所替代。电解镀锡钢板可以采用钢基体金属的两表面以相等或不相等镀锡量的方式进行生产。双面相等镀层的镀锡钢板的单层名义厚度范围为0.38~1.5μm（15~60μin）。不相等镀层（不等镀锡钢板）的较厚一面镀层很少超过2.0μm（80μin）。镀锡钢板是按照0.15~0.60mm（0.006~0.024in）的厚度进行生产的。

全世界生产的镀锡钢板超过90%应用于容器（镀锡钢皮罐）。传统的镀锡钢皮罐用三片镀锡钢皮制成的：两端盖及一个软钎焊侧缝的盒身。制盒的新技术已能通过深拉和烙边进行两片盒的生产。镀锡钢板的最为重要的用途就是食物制品、啤酒和软饮料的包装，但是它们还能用于装储油漆、电动机润滑油、消毒剂、洗洁剂和抛光剂。镀锡钢板的其

他用途还包括标牌、过滤器、蓄电池、玩具、垫片以及用于装药品、化妆品、燃料、烟草和许多其他商品的容器。

电镀。电镀是锡及其化学物质的主要用途之一。锡作为阳极，并将锡的化学物质用于配制各种电解液，用于不同带基的镀层。电镀可以在酸性或碱性溶液中进行。钠或钾的锡酸盐能制成碱性镀锡电解液的母液，这种电解液非常有效，并能生产出高质量的沉积。这种碱性锡酸盐镀槽的优点就是它们不会对钢造成腐蚀，并且它们也不要求添加剂。酸性镀锡溶液要在较高的电流密度中运行，并有较高的电镀速度以及要求添加有机化合物。

有许多的合金镀层可以在混合锡酸盐-氰化物电镀液中的电镀得到，包括锡-锌和锡-镉合金以及很大范围的锡-铜合金(青铜)的镀层。青铜的含锡量范围从7%~98%。红青铜沉积含有高达20% Sn，高锡青铜也称镜(青)铜，通常含有大约40% Sn。

锡镍和锡铅电镀使用酸性电解液进行电镀的，并且是印刷电路板和电子元件的重要镀层。锡钴电镀适合于要求有诱人的外观加工和良好的耐腐蚀性的用途。

工业上还常用两种三元合金电镀，即用于轴承表面的铜-锡-铅和用于某些电子用途的铜-锡-锌合金镀层。

热浸镀。用铅-锡合金(3-15% Sn)镀钢能用于生产一种称为镀铅锡钢板的材料(见本篇第7章)。镀铅锡钢板容易成形和软钎焊。它用于作为屋面和风化密封材料，以及用于汽车汽油箱、标牌、散热器上水箱、支架、电子设备的底板和顶盖以及电缆和管线包覆的结构用途。

热浸镀镀层用于元件引入接头的导线和食物转运和处理的设备上。此外，热浸锡镀层还能为轴承座浇铸巴比合金衬套提供粘结层。

纯(非合金化)锡

最少含有99.8% Sn的工业锡就可以认为是纯锡。根据ASTM B339的规定，在各种不同类型的工业纯锡中，有大约80%~90%属于所谓的牌号A的高纯度工业锡。按照这个规定，牌号A锡必须至少含有99.85% Sn的纯度和最多0.04% Sb、0.05% As、0.030% Bi、0.001% Cd、0.04%Cu、0.010%Fe、0.05% Pb、0.01% S、0.005Zn和0.01%(Ni+Co)的残余杂质。

只有少数用途需要用纯锡。非合金化锡作为最实用的衬里材料应用于蒸馏厂高纯度水的储运，因为它相对纯水具有化学惰性而且不会以任何形式污染水。

在平板玻璃制造业里，熔化玻璃从炉里倒入有熔化锡表面的槽里，槽用含有氮和一些氢的气氛进行保护，以防止氧化。依靠槽中的表面自然张力和重力通常能生产约6mm(1/4in)的平板玻璃，但是玻璃厚度是通过控制熔化玻璃从浮槽拉出来的速度和锡的温度进行调节的。利用这种工艺能形成玻璃板带的平整且平行的表面，而且玻璃的表面非常光滑且不需要进行抛光。

化学物质中的锡

用于制造含有锡的有机和无机化学物质构成金属锡的主要用途之一。在过去的四分之一的世纪里，锡化合物的应用有了快速的增长，以致锡化学工业也从以回收再生锡为主转变为大量消耗原始锡锭。

锡化学物质得到多种多样的广泛应用，像用于电镀锡及其合金的电解溶液，用于陶瓷和瓷釉的颜料和遮光剂，用于塑料的催化剂和稳定剂，农产品中用的农药、防霉剂和防污剂，油漆和粘结剂，以及润滑油中防腐蚀添加剂。

锡基合金

软钎焊料。在美国，其使用量最大。在这种焊料中，锡是最重要的组分，因为它能在远低于这些金属熔点的温度下润湿和粘附于许多普通的基体金属上。利用锡中加入铅，能生产出熔点低于锡或铅的合金焊料。将少量不同的金属尤其是锑和银，加入锡-铅的软钎焊料还可提高其强度。这种焊料可以用于承受高温或甚至零下温度的使用构件的钎焊上。

软钎焊料的成分及软钎焊连接的应用是多种多样、层出不穷的(表3.6-1)。工业纯锡适用于特殊食物制品和喷雾器所用的罐盒上侧缝的软钎焊。电子和电器行业中应用的软钎焊料含有40%~70% Sn，以此为各种不同的介质条件提供坚固可靠的连接。高锡含量的软钎焊料还用于电器设备的连接件上，因为它们的导电性比高铅焊料更高。高锡软钎焊料还用于铅会引起中毒的如同食物相接触或饮用水管道的用途。

表 3.6-1 所列锡基软钎焊料的化学成分极限和典型用途

普通名称	代号	成分极限(质量分数,%)①	典型用途
工业纯锡	ASTM B339 牌号 A	99.85Sn 最小, 0.04Sb, 0.05As, 0.015Bi, 0.001Cd	0.04Cu, 0.015Fe, 0.05Pb, 0.01S, 0.005Zn, 0.01Ni + Co
锑-锡软钎焊料	ASTM B32 牌号 Sb5	95Sn, 4.5 ~ 5.5Sb, 0.015Ag, 0.005Al, 0.05As, 0.15Bi, 0.03Cd, 0.08Cu, 0.04Fe, 0.2Pb, 0.005Zn	软钎焊电器设备, 铜管接头, 冰箱的冷却盘管。耐 SO_2
锡-银软钎焊料	ASTM B32 牌号 Sn95	95Sn	0.12Sb, 4.4 ~ 4.8Ag, 0.005Al, 0.01As, 0.15Bi, 0.005Cd, 0.08Cu, 0.02Fe, 0.10Pb, 0.005Zn。电器和高温用元件的软钎焊
锡-银共晶合金	ASTM B32 牌号 Sn96	96Sn, 0.12Sb, 3.4 ~ 3.8Ag, 0.005Al, 0.01As, 0.15Bi, 0.005Cd, 0.08Cu, 0.02Fe, 0.10Pb, 0.005Zn	通常按类似于 ASTM B32 牌号 Sn95 的性能进行选择
软钎焊料 (70-30 焊料)	ASTM B32 牌号 Sn70	70Sn, 0.50Sb, 0.015Ag, 0.005Al, 0.03As, 0.25Bi, 0.001Cd, 0.08Cu, 0.02Fe, 30Pb 名义, 0.005Zn	金属的连接和涂层
共晶焊料 (63-37 软焊料)	ASTM B32 牌号 Sn63	63Sn, 0.50Sb, 0.015Ag, 0.005Al, 0.03As, 0.25Bi, 0.001Cd, 0.08Cu, 0.02Fe, 37Pb 名义, 0.005Zn	用于电子元件的熔点最低(共晶)的软钎焊料
软钎焊料 (60-40 焊料)	ASTM B32 牌号 Sn60	60Sn, 0.50Sb, 0.015Ag, 0.005Al, 0.03As, 0.25Bi, 0.001Cd, 0.08Cu, 0.02Fe, 40Pb 名义, 0.005Zn	用于电子和电器元件的软钎焊料, 特别是印刷电路板的批量软钎焊

①最大值, 除非有范围或名义值的规定。

一般性的软钎焊料(50Sn-50Pb 和 40Sn-60Pb)应用于灯具工程用途、管道工程和金属薄板加工的用途。低锡软钎焊料(20%~35% Sn,余量为 Pb)用于连接电缆和汽车散热器、换热器的生产上。有些软钎焊料用于填补汽车车身的接缝和焊缝处的缝隙, 以此提供光滑的连接和轮廓。

锡-锌软钎焊料用于连接铝。锡-锑和锡-银软钎焊料用于要求接头有高抗蠕变性的用途, 和要求无铅软钎焊料成分的用途, 如饮用水管道。另外, 含有 5% Sb(或 5% Ag)的软钎焊料适用于比锡-铅软钎焊料高的温度的应用场合。

表 3.6-2 列出了所选锡基软钎焊料的电学和力学性能数据。进一步的内容可查阅本手册“连接”一章。

白镴。这是一种含有锑和铜的白色锡基合金。原先, 白镴规定为一种锡铅合金, 但为了防止其毒性和表面无光泽, 现代的白镴中去除了铅。现在的成分含有 1% ~ 8% Sb 和 0.25% ~ 3.0% Cu(表 3.6-3)。白镴的铸造合金中的铜含量通常低于用于回转中空制品的白镴, 故而在铸造温度有更好的流动性。

白镴具有可锻性和塑性, 并易于旋压或成形成为复杂的结构和型材。白镴零件不需要在加工过程中进行退火。如今生产的许多服装饰件都是在用橡胶或硅酮制成的铸型里通过离心浇铸而成的。典型的白镴产品包括咖啡用具和茶具、茶盘、啤酒杯、带把的杯子、糖果盘、珠宝、碗、盘子、叶片以及烛台。

表 3.6-2 所选锡基软钎焊料的电学和力学性能

锑-锡软钎焊料(95Sn-5Sb)

拉伸性能。铸造：典型的抗拉强度，40.7MPa(5.9ksi)；100mm(4in)伸长率38%。软钎焊铜接头：典型的抗拉强度，97.9MPa(14.2ksi)抗剪强度。铸造，41.4MPa(6.0ksi)

软钎焊铜接头：76.5MPa(11.1ksi)

冲击强度。铸件(悬臂梁式试验)，27J(20lbf · ft)

电导率。体积的，11.9% IACS 温度为20℃(68℉)

电阻率。145nΩ · m，温度为25℃(77℉)

锡-银软钎焊料(95Sn-5Ag)

拉伸性能。薄板，厚度1.02mm(0.04in)室温时效14天：典型抗拉强度，31.7 MPa(4.6ksi)；屈服强度，24.8 MPa(3.6ksi)；50mm(2in)伸长率，49%。软钎焊铜接头：典型抗拉强度，96.5MPa(14ksi)

抗剪强度。焊铜接头：73.1MPa(10.6ksi)

电导率。体积的，16.6% IACS 温度为20℃(68℉)

电阻率。104nΩ · m，温度为0℃(32℉)

电阻率的系数。0-100℃(32-212℉)，42.3pΩ · m/K

70-30 软钎焊料(70Sn-30Pb)

拉伸性能。铸造：典型的抗拉强度，46.9MPa(6.8ksi)

硬度。12HB

电导率。体积的，11.8% IACS

电阻率。146nΩ · m

共晶软焊料(63Sn-37Pb)

拉伸性能。铸造：典型的抗拉强度，51.7MPa(7.5ksi)；100mm(4in)伸长率32%。软钎焊铜接头：典型的抗拉强度，200MPa(29ksi)

抗剪强度。铸造，42.7MPa(6.2ksi)。

软钎焊铜接头：55.2MPa(8ksi)

硬度。铸造，14HB

冲击强度。铸件(悬臂梁式试验)，20J(15lbf · ft)

蠕变特性。最小蠕变率：室温和2.3 MPa(335psi)，每日0.1mm/m(100μin/in)；80℃(176℉)和467 MPa(68psi)，每日0.1mm/m(10μin/in)(原文如此，疑有误——译者注)

动力粘度。温度为280℃(536℉)时，为1.33mPa · s(0.0133P)

液体表面张力。温度为280℃(536℉)时，为0.490N/m

电导率。体积的，11.8% IACS

电阻率。146nΩ · m

60-40 软钎焊料(60Sn-40Pb)

拉伸性能。大块的软钎焊料室温(测试主要取决于铸造和试验的条件)：

平均抗拉强度，52.5 MPa(7.61ksi)；伸长率，30%~60%

抗剪强度。平均，37.1MPa(5.38ksi)(主要取决于铸造和试验的条件)

硬度。16HV(取决于铸造条件)

弹性模量。拉伸(大块软钎焊料)，30.0CPa(4.35×10^6psi)

蠕变特性。限制蠕变应力，室温和2.2~3.0MPa(320~430 psi)，每日应变率为10^{-4}m/m。断裂寿命：在应力4.5 MPa(650psi)温度26℃(79℉)下1000h；在应力1.4 MPa(200psi)温度80℃(176℉)下1000h

动力粘度。估计在液态温度下2.0 mPa · s(0.020P)

液体表面张力。估计温度为330℃(626℉)时，为468mN/m，430℃(806℉)时，为461mN/m

电导率。体积的，11.5% IACS

电阻率。149.9nΩ · m

热电势。相对铜测量，与纯锡相同

超导性的温度。7.05K。临界场，1.3K 时 83.2mT

表 3.6-3 现代白镴的化学成分极限值

技术指标	化学成分(质量分数,%)							
	Sb	Sb	Cn	Pb 最大	As 最大	Fe 最大	Zn 最大	Cd 最大
ASTM B560								
型号 1①	90~93	6~8	0.25~2.0	0.05	0.05	0.015	0.005	—
型号 2②	90~94	5~7.5	1.5~3.0	0.05	0.05	0.015	0.005	—
型号 3③	95~98	1.0~3.0	1.0~2.0	0.05	0.05	0.015	0.005	—
BS 5140	余量	5~7	1.0~2.5	0.5	—	—	—	0.05
		3~5	1.0~2.5	0.5	—	—	—	0.05
DIN 17810	余量	1~3	1~2	0.5	—	—	—	—
		3.1~7.0	1~2	0.5	—	—	—	—

①铸造合金，常规成分为92Sn-7.5Sb-0.5Cu。 ②薄板合金，常规成分为91Sn-7Sb-2Cu。 ③特种合金。

轴承合金。锡有低的摩擦因数，这是作为轴承材料使用需首先要考虑的。锡是一种结构弱金属，当将其应用于轴承时，将其与铜、锑制成合金，以此提高硬度、抗拉强度和耐疲劳性。正常情况下，这种称为

锡基巴氏合金的合金中铅的合金含量控制在0.35%~0.5%，以避免形成锡-铅共晶，从而会使其强度性能在运行温度下显著降低。

铅基轴承合金也称为铅基巴氏（巴比特）合金，它们含有高达10% Sn和12%~18% Sb。一般来说，这些合金在强度方面低于锡基巴比特合金，相应地，它们有较低的成本。这些合金组分的偏析会导致在离心浇铸衬套过程中的一些困难。在铸造时，仔细选择与轴承尺寸相关的旋转速度是很必要的。加入铈、砷或镍也有助于控制这些合金的偏析。

除了锡基和铅基巴比特合金以外，还有一系列介于它们之间的铅-锡轴承合金。这些合金含有20%至65%的铅和锡再加上不同量的锑和铜。提高这些合金含量可以获得更高的硬度和更好的铸造性。这些合金的熔化也比铅基巴比特合金更不容易发生偏析。然而铸造这些中间轴承合金比起无论锡基还是铅基巴比特合金，其强度都有所下降。

轴承合金必须在软度和强度之间保持一种平衡。铝-锡轴承合金在对高疲劳强度的要求与对良好的表面性能如软度、抗咬死性、镶嵌性等的需要之间代表了一种极佳的权衡。铝-锡轴承通常与淬硬钢或球墨铸铁的曲轴结合使用，并且其承载能力比锡或铅基轴承合金都有明显较高的增加。

低锡铝基合金（5%~7% Sn）含有少量强化元素如铜和镍，常用于重载发动机的连杆和推力轴承。必须采用严格的尺寸公差，还要防止油的污染。含有20%~40% Sn、余量为铝的合金具有极佳的耐因油膜破裂的产物而引起的腐蚀性和很好的镶嵌性，特别是在有灰尘的环境中。较高含锡量的合金具有合适的强度和较好的表面性能，故而在大马力船用柴油机的十字头轴承中十分有用。

表3.6-4所列的是由ASTM和SAE标准所规定的不同锡基轴承合金的化学成分。进一步有关轴承材料的内容可参阅本篇第14章。

表3.6-4 锡基轴承合金的常规成分

牌号	常规成分（质量分数，%）				牌号	常规成分（质量分数，%）			
	Sn①	Sb	Cu	Pb 最大②		Sn①	Sb	Cu	Pb 最大②
ASTM B23 合金					**SAE 合金**				
合金1	91.0	4.5	4.5	0.35	SAE11	86.0	6.0~7.5	5.0~6.5	0.50
合金2	89.0	7.5	3.5	0.35	SAE12	88.0	7.0~8.0	3.0~4.0	0.50
合金3	84.0	8.0	8.0	0.35	**中间铅-锡合金**				
合金11	87.5	6.8	5.8	0.50	铅-锡巴比特合金	75	12	3	9.3~10.7
					ASTM B102，合金PY 1815A	65	15	2	17~19

①ASTM合金中要求的最小值，SAE合金中规定的最小值。 ② 最大值，除非范围规定。

用于风琴管的合金。锡-铅合金适用于制造风琴管。这种材料普通称为斑点金属，因为它们在铸造台上凝固成带材时，形成大的成核晶体或斑点。风琴和谐的音调就是由这种按照音调的要求用含有从20%~90%不同含锡量的合金制成的管子产生的。浑厚的音调一般是由富铅合金产生，而随着含锡量的增加，音调也变得越来越明亮。冷轧的Sn-Cu-Sb合金（95% Sn）也能成功地应用于制造管子，而且采用这种管子能改善成品管子的制造效率和速度。这种成分还能提供光亮的外观，因此比锡-铅合金抗黯然失色的能力更强。

易熔性合金。易熔合金均属于一百多种的能在相对较低的温度下熔化的合金。大多数工业用易熔性合金都含有铋、铅、锡、镉、铟和锑，这一类中的特殊合金也可含有相当量的锌、银、铊或镓。

工业上应用的许多易熔合金都是基于共晶成分。这种合金在自动安全装置例如消防喷淋系统、锅炉安全塞和炉子控制器上有着重要的应用。在正常的外界温度下，这种合金能有足够的强度将零件连接在一起，但是一旦达到特定的高温，易熔合金的连接就会发生熔化，于是零件被断开。锡基共晶易熔合金的例子有：

技术指标	熔化温度	
	℃	℉
51.2Sn，30.6Pb，18.2Cd	142	288
67.75Sn，32.25Cd	177	351
61.86Sn，38.14Pb	183	362
91Sn，9.0Zn	199	390
96Sn，3.5Ag	221	430

进一步有关易熔合金的内容可参阅本篇第14章。

其他锡基合金。它们包括用于珠宝的白金属(92Sn-8Sb)，用于可伸缩管子和可折叠薄片的硬锡(99.6Sn-0.4Cu)，以及用于食物包装的锡箔。

其他含锡合金

电池板栅合金。铅-钙-锡合金开发用于蓄电池板栅并主要替代Sb-Pb合金。含量高达1.3%Sn的三元铅基合金能大大减少电池出气，于是用这种合金制成的带有板栅的电池在其工作寿命期间内不再要求定期加水。板栅的两种主要制造方法就是铸造和锻压合金的加工，锻压合金的加工包括冲压、轧锻和金属网制造工艺。

铅字合金。是一种含有不同比例的铅、锑和锡的铸造合金。在其从液态金属凝固的过程中，它们不易发生偏析，但是它们会因为铸型里的空气难以外逸而在其铅字和型芯的中央部位造成疏松。在使用这种合金时，应该通过快速浇铸将铸型很好地注满，并且应有足够高的金属温度来防止发生过早凝固和气体的滞留。

铜合金。铜锡青铜大概是人类最早使用的合金，至今还在结构和装饰用途上继续得到应用。实用青铜含有高达10%的锡和非常少量的磷。含有5%Sn、5%Zn、5%Pb和余量为铜的四元青铜应用于要求有适度强度和致密度的一般用途的铸件如齿轮、泵和汽车配件上。含有20%至24%Sn的特种铜基合金，有史以来一直用于制造音色质量极佳的铸钟。含有2%~8.5%Sn的Cu-Ni-Sn调幅分解合金具有极佳的弹性性能，并且能在某些弹簧和电接触应用中代替无锡铜-镍合金。除了在这些铜基合金中应用以外，铜-锌合金(黄铜)还要加入少量的锡(0.75%~1.0%)来提高其耐腐蚀性。铸铅黄铜能含有高达4%Sn。

齿合金。用于制造含有银、锡、汞以及一些铜和锌的汞齐合金。铜能提高其硬度和强度，锌在合金的制造过程中发挥脱氧剂的作用，保护主要组分不受氧化。目前大多数的齿合金都含有25%~27%Sn，并主要由金属间化合物Ag_3Sn构成。对于高级牙齿修补，当金合金增加瓷质镶面时，在其金合金里加入1%Sn可确保其与瓷质的粘结。

铸铁。在片状灰铸铁或球墨铸铁里，含有大约0.1%Sn能保证获得完全的珠光体组织，这种珠光体甚至能保持至较高温中。工业纯锡是以一种圆粒状、条状或铸造碎块的形式加入铸铁的，在冲天炉里熔化时，一般将锡加入浇包里或者当铁液从冲天炉流出时加入出铁槽里。在生产球墨铸铁铸件时，锡也可以随适当的孕育剂加入特定的混料室中。因为这个混料室属于铸型的整体部分，故这种技术使熔化材料在进入铸型后能得到一步性处理，从而防止发生衰变(即在金属铸造前丧失孕育添加剂的有效性)。此外，混料室还能使锡在铁中立即溶解，以此保证在铸件中的均匀分布。

钛合金。锡能通过形成固溶体来强化钛合金。钛以低温相(α相)或较高温相(β相)存在，而且能保持稳定直到熔点。在钛合金中，在使用温度下，α相和β相的相对量对其性能具有很深的影响。加入铝能提高相变温度，并使α相稳定化，但是数量超过7%，它们会造成脆化。然而，由于锡的加入，能使铝稳定化的α钛合金强度得到提高却不发生脆化。含有5%Al和2.5%Sn能使其获得最佳的强度和加工性，此外，这种合金还有焊接性的优点。α-β钛合金含有铝作为其α稳定剂和β稳定剂的组合(如铬、铁、钼、锰或钒)，以及含有锡和锆作为替代的固溶体强化元素。这样的合金具有在高温下的良好强度和抗蠕变性。许多这类合金的强度和成形性都能借助各种热处理进行优化。

锆合金。跟钛合金相似，它们所含有的元素可以分为两大类：α稳定剂，用于提高相变温度；β稳定剂，会使其降低。锡和铝是锆合金中的α稳定剂，可增强其高温强度。一种含有0.15%~2.5%Sn的工业系列的耐腐蚀锆合金(Zircaloys，锆-锡合金)被开发用于核应用。

粉末应用。许多粉末的供应都用于制造烧结青铜或烧结铁零件。然而锡粉在管道和电子制造工业所需的软钎焊膏和焊糊的制造中的应用也日益见多。锡和锡合金粉末在食品加工设备上的喷涂、非导体的金属化以及轴承修理方面也有少量的应用。

加入25%Sn粉末和3%Cu粉末将有助于铁压实块的烧结。锡能提供一种低熔点相，再由其为铁提供弥散路径。在950℃(1740℉)烧结的铁-锡-铜压实块具有在1150℃(2100℉)烧结的含有7%~10%Cu的铁-铜粉末冶金零件相媲美的力学性能。除此之外，Fe-Sn-Cu混合物料有助于其精加工尺寸的严格控制，而且这种控制最终导致质量和成本效率的提高。

耐腐蚀性

锡能与强酸和强碱发生反应，但是比较耐近乎中性的溶液的腐蚀。氧会大大加速其在水性溶液中的腐蚀。一般来说，受无机酸侵蚀的速度会随温度和浓度的提高而增加。弱碱的稀释溶液对锡几乎没有什么影

响，但是强碱即使是冷、稀溶液对锡也有腐蚀性。当有氧化剂或空气存在时，具有一种酸性反应的盐会侵蚀锡。锡能耐经软化水的腐蚀，但当其接近水管时，会遭受硬自来水的轻度侵蚀。锡在特定介质中的耐腐蚀性如表3.6-5所示。有关腐蚀的进一步内容可参阅《ASM手册》第13卷腐蚀(1987)。

表3.6-5 锡对特定腐蚀剂的耐腐蚀性

腐蚀剂	耐腐蚀性	备注	腐蚀剂	耐腐蚀性	备注
乙酸	轻度侵蚀	因空气而增加	氨	耐侵蚀	—
丁酸	耐侵蚀	—	溴	重度侵蚀	—
柠檬酸	中度侵蚀	在输水管线	四氯化碳	耐侵蚀	—
脂肪酸	中度侵蚀	—	氯	重度侵蚀	—
盐酸	重度侵蚀	空气存在	碘	重度侵蚀	—
氢氟酸	重度侵蚀	空气存在	牛奶	耐侵蚀	—
乳酸	中度侵蚀	因空气而增加	汽车燃料	耐侵蚀	—
硝酸	重度侵蚀	—	石油产品	耐侵蚀	—
乙二酸	中度侵蚀	①	氢氧化钾	重度侵蚀	因空气而增加
磷酸	耐侵蚀	—	碳酸钠	轻度侵蚀	—
盐式酸	重度侵蚀	空气存在	氢氧化钠	重度侵蚀	因空气而增加
硫酸	重度侵蚀	②	蒸馏水	耐侵蚀	—
酒石酸	轻度侵蚀	—	海水	轻度侵蚀	—
空气	耐侵蚀	—			

①普通有机酸中最具腐蚀性的。 ②随浓度和空气的存在而增加。

精选参考文献

- E.S. Hedges, *Tin and Its Alloys*, Edward Arnold, Ltd., 1960.
- W.E. Hoare, E.S. Hedges, and B.T.K. Barry, *The Technology of Tinplate*, Edward Arnold, Ltd., 1965.
- D.J. Maykuth and W.B. Hampshire, Corrosion of Tin and Tin Alloys, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 770–783.
- C.L. Mantell, *Tin: Its Mining, Properties, Technology, and Applications*, Hafner Publishing, 1970.
- E. Morgan, *Tinplate and Modern Canmaking Technology*, Pergamon Press, 1985.
- J.W. Price, *Tin and Tin Alloy Plating*, Electrochemical Publication Ltd., 1983.
- *The Properties of Tin*, Publication No. 218, International Tin Research Institute, 1954.
- *Steel Products Manual: Tin Mill Products*, The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1992.
- M.E. Warwick, Developments in the Use of Tin in Ferrous Powder Metallurgy, *Met. Powder Rep.*, Vol 39 (No. 6), June 1984; Publication No. 649, in Research Institute, 1984.
- P.A. Wright, *The Extractive Metallurgy of Tin*, 2nd ed., Elsevier, 1982.

第7章 铅和铅合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，543~556页；《ASM 手册》第13卷腐蚀，1987，784~792页。其他有关内容可以查阅本章末所列的参考文献。

铅是最早为人类认识的金属之一。铅矿相对容易进行还原，因此自从公元前3000年之前，人们就知道铅并将其应用于装饰和结构的用途。使得铅有广泛用途的性能有密度（$11.34g/cm^3$）、可塑性、润滑性、导电性和线膨胀系数，所有这些性能都很高，而强度、抗蠕变性、弹性模量、弹性极限、硬度和熔点（327℃或621℉）却十分低。铅还在很大的工况范围里具有良好的耐腐蚀性。铅易于与许多其他金属合金化，且铸造也没有什么困难。

铅和铅合金最为突出的应用就是铅酸蓄电池、软钎焊料、电缆包皮和建筑用的构建材料（例如薄板、管线和填料）。其他的重要用途包括砝码、轴承、弹药、活字金属、镀铅锡钢板以及箔片。铅能以不同的形式及组合作为控制声音、机械振动和屏蔽X射线、γ射线的材料获得应用。此外，铅可作为合金元素用于钢和铜合金，用以改善切削性，还用于易熔（低熔点）合金里。还以铅化合物的形式相当大量地应用于颜料、玻璃和陶瓷产品，以及一些化学物质。以下是在美国铅的应用分类：

应用	吨数×10^3		
	1994	*1995*	*1996*
电池	1223	1356	1412
电缆包皮	16	6	7
管线/薄板	25	30	37
化学物质	63	62	67
弹药	62	71	58
合金	43	47	87
其他	18	27	13
合计	1450	1599	1681

引自：国际铅和锌研究小组（英国，伦敦）。

因为铅会对健康造成危害（毒性），故它不应用于处置非常软的饮用水，也不应该与食物接触。应当防止吸入铅尘和铅烟雾，含铅油漆必须远离家居/房屋以免为人体所吸收，尤其是儿童。

铅的生产

粗铅。铅矿藏遍及全世界。尽管并不认为它是一种稀有金属，但仅占有地壳的0.0016%。然而，铅矿易于在矿穴里被富集，使其矿石的开采较为经济。世界上的主要铅矿中心包括澳大利亚（最大生产商），紧随其后的是中国、美国、秘鲁和加拿大。

虽然已知至少有60种含铅矿石，但到至今最重要的粗铅矿源还是方铅矿（硫化铅，PbS）。利用浮选法将方铅矿从其相连的矿石中分离出来，以此使矿石富集。富集矿经烧结和焙烧，接着在鼓风炉中熔炼成为不太纯的粗铅锭，然后在后续的纯化工艺中，去除大部分的残留的铜、锑、锡、砷、锌、贵重金属和铋。最后一道工序往往是电解精炼。≥99.99%的纯度还是不难达到的。

再生铅。多年来，利用回收的废料生产铅变得日益重要，达到美国所生产的60%以上。回收的废铅料主要是铅酸电池。有关回收铅的进一步详细介绍可参阅本手册“回收和循环使用寿命分析”一章。

产品形式

铅（及其大部分合金）所具有的可锻延性，使它能轧制成从50~0.013mm（2~0.0005in）所要求的任意厚度。薄板的宽度按标准生产达到3.6m（11¾ft），如需要更大的尺寸也是可行的。由于便于切割成所需要的尺寸和形状，铅薄板可以通过铅焊（气割）或软钎焊制成有用的构件。薄板可以冲压制成垫片、垫圈和冲挤毛坯。通过将铅和锡置于一起轧制能生产镀锡薄铅板。

铅经挤压可加工成管线、圆棒、线材以及各种实用的横截面如H形的玻璃窗有槽铅条、中空星形零件和矩形管道等。工业所用的挤制件从305mm（12in）的管道小到0.25mm（0.010in）直径的软钎焊丝都是可行的。铅可缠绕着圆钢以及像橡胶或塑料一样地包裹动力电缆的软材料进行挤制。普通的熔芯软钎焊料和

软管就属于各种典型的铅和铅合金挤压制品。

铅的低熔点(327℃或621℉)使之成为能在约425℃(800℉)的温度下进行铸造的最简单金属之一。它用于称重砝码、帆船龙骨以及在仪器中的微小型压铸件。活字金属说明能压型成细微的结构，蓄电池金属铅板就是工业用铅铸件的用例。小型的压铸件如壁厚1.3mm和小到0.025mm(0.001in)的重复生产的铸造尺寸都是可能的，锑、锡、砷或一些其他元素都能与铅制成具有特定性能如铸造性、强度和较高硬度的合金。

当将熔化铅倒入流经一个筛子并呈自由流体落下时，由于其表面张力能在凝固之前形成非常完整的球形，利用它的这种优点可以生产铅粒。颗粒的粒度由筛孔的大小控制。铅粒汇集在铅粒塔台的底部，并精确地按从1~5.75mm(0.04~0.23in)的粒度分成等级。较大尺寸的铅粒用金属模铸造而成。通过大量生产，大部分的铅粒都是用作猎枪的弹药。当整体或屏蔽部位要求呈不规则腔体时，可以使用易于倾倒和流动自如的铅粒。

通常采用雾化法生产的铅粉、颗粒和片屑其直径均为4μm及以上。当将这些颗粒加入润滑脂或管线接头填料时，将能使其获得一些有用的性能。它们还能作为粉末冶金产品如轴承、制动器垫片和离合器贴面的组分而得到应用。铅和铅合金粉末还用于配制软钎焊膏。作为放射性屏蔽和消音产品，还能将铅粉调和混入橡胶和塑料。

铅绒是一股质量约为0.75kg/m(0.5lb/ft)的松散纤维绳，是让液态铅经由一个细筛并使其凝固而成的。将这种纤维绳用相当大的力挤压进入间隙，它会冷焊成为一种均质的物质并形成固态金属密封。当由于温度或爆炸的危险而禁止使用火焰加热时，这种铅绒纤维绳的填堵工艺是十分有用的。核潜艇中常采用铅绒来填堵铅防护板之间的缝隙。

成分与牌号

表3.7-1所列的是由统一编号系统(UNS)规定的不同工业纯的铅和铅基合金的代号。其代号是按照一般名义化学元素含量进行分组的。

表3.7-1 不同铅牌号和铅基合金的UNS分类和常规成分

铅合金种类[①]	UNS编号
纯铅(UNS L50000~L50099)	
区熔精炼铅(最低99.9999%Pb)	L50001
精炼软铅(最低99.999%Pb)	L50005
精炼软铅(最低99.99%Pb)	L50011, L50012, L50013, L50014
腐蚀铅(最低99.94%Pb)	L50042
普通铅(最低99.94%Pb)	L50045
铅-银合金(UNS L50100~L50199)	
电缆包皮合金(0.2%Ag,99.8%Pb)	L50101
电解沉积合金(0.5%~1.0%Ag,99.5%~99%Pb)	L50110, L50115, L50120
电解沉积合金(1.0%Ag,1.0%As,98%Pb)	L50122
阴极保护的阳极合金(2.0%Ag,98%Pb)	L50140
软钎焊料(1.0%~1.5%Ag,1.0%Sn,余量为铅)	L50121, L50131
软钎焊料(1.5%~2.5%Ag,不含锡)	L50132, L50150, L50151
软钎焊料(1.5%Ag,5.0%Sn,93.5%Pb)	L50134
软钎焊料(2.5%Ag,2.0%Sn,95.5%Pb)	L50152
软钎焊料(5.0%Ag,95%Pb)	L50170
软钎焊料(5.0%Ag,及5%Sn或5%In)	L50171, L50172
软钎焊料(3.5%Ag)	L50180
铅-砷合金(UNS L50300~L50399)	
砷铅电缆包皮合金(0.15%As,0.10%Bi,0.10%Sn,99.6%Pb)	L50310
铅-钡合金(UNS L50500~L50599)	
铅-钡合金(0.05%Ba,99.9%Pb)	L50510
铅-锡-钡合金(0.05%~0.10%Ba,1.0%~2.0%Sn,97.9%~99%Pb)	L50520, L50522, L50530, L50535

（续）

铅合金种类①	UNS 编号
钡-钙-铅合金(Frary metal)(0.4%~1.2%Ba, 0.5%~0.8%Sn, 97.2%~98.8%Pb)	L50540, L50543
铅-钙合金(UNS L50700~L50899)	
铅-钙合金(99.9%Pb,0.008%~0.03%Ca)	L50710, L50720
电缆包皮合金(0.025%Ca,99.7%~99.9%Pb,0.0%~0.025%Sn)	L50712, L50713
铅-铜-钙合金(99.9%Pb,0.06%Cu,0.03%Ca)	L50722
电解沉积阳极合金(0.5%Ag,99.4%Pb,0.05%Ca)	L50730
电池铅板合金(99.9%Pb,0.06%Ca)	L50735
电池铅板合金(0.065%Ca,0.2%~1.5%Sn,99.7%~98.4%Pb)	L50736, L50737, L50740, L50745, L50750, L50755
电池铅板合金(0.07%Ca,0.0%~0.7%Sn,99.2%~99.9%Pb)	L50760, L50765
电池铅板合金(0.10Ca,0.0%~1.0%Sn,98.9%~99.9%Pb)	L50770, L50775, L50780, L50790
电池铅板合金(0.12Ca,0.3%Sn,99.6%Pb)	L50795, L50800
轴承合金(0.02%Al,0.04%Li,0.7%Ca,0.6%Na,98.7%Pb)	L50810
轴承合金(0.02%Al,0.04%Li,0.7%Ca,0.2%Na,0.4%Ba,98.7%Pb)	L50820
铅钙合金(1.0%~6.0%Ca,94.0%~99.0%Pb)	L50840, L50850, L50880
铅-镉合金(UNS L50900~L50999)	
铅-镉共晶合金(17.0%Cd,83%Pb)	L50940
铅-铜合金(UNS L51100~L51199)	
铜铅(0.05%Cu,99.9%Pb)	L51110
化学铅(表3.7-2)	L51120
含铜铅(0.06%Cu,最低99.9%Pb)	L51121
铅-碲-铜合金(0.06%Cu,0.045%~0.055%Te,99.82%~99.85%Pb)	L51123, L51124
铜软铅(0.06%Cu,最低99.9%Pb)	L51125
含铜铅合金(51%Pb,3.0%Sn,其他最高0.8%,其余为铜)(合金485 SAE J460)	L51180
铅-铟合金(UNS L51500~L51599)	
铅-铟-银合金软钎焊料(2.38%~2.5%Ag,4.76%~5.0%In, 92.5%~92.8%Pb)	L51510, L51512
铅-铟合金软钎焊料 (5.0%In,95.0%Pb)	L51511
铅-铟合金(19.0%~70%In,30%~81%Pb)	L51530, L51532, L51535, L51540, L51550, L51560, L51570
铟-锡-铅合金(40%In,40%Sn,20%Pb)	L51545
铟-银-铅合金(80%In,5%Ag,15%Pb)	L51585
铅-锂合金(UNS L51700~L51799)	
铅-锂合金(0.01%~0.07%Li,99.9%Pb)	L51705, L51708, L51710, L51720, L51730
铅-锡-锂合金(0.02%~0.04%Li,0.35%~0.7%Sn,99.2%~99.9%Pb)	L51740, L51748
铅-锡-锂-钙合金(0.08%~0.065%Li,1%~2%Sn, 0.02%~0.15%Ca, 97.8%~99.6%Pb)	L51770, L51775, L51778, L51780, L51790
铅-锑合金(UNS L52500~L53799)	
铅-锑合金(<1.0%Sb)	L52500~L52599
铅-锑合金(1.0%~1.99%Sb)	L52600~L52699
铅-锑合金(2.0%~2.99%Sb)	L52700~L52799
铅-锑合金(3.0%~3.99%Sb)	L52800~L52899

（续）

铅合金种类①	UNS 编号
铅-锑合金(4.0%~4.99%Sb)	L52900~L52999
铅-锑合金(5.0%~5.99%Sb)	L53000~L53099
铅-锑合金(6.0%~6.99%Sb)	L53100~L53199
铅-锑合金(7.0%~8.99%Sb)	L53200~L53299
铅-锑合金(9.0%~10.99%Sb)	L53300~L53399
铅-锑合金(11.0%~12.99%Sb)	L53400~L53499
铅-锑合金(13.0%~15.99%Sb)	L53500~L53599
铅-锑合金(16.0%~19.99%Sb)	L53600~L53699
铅-锑合金(>20%Sb)	L53700~L53799
铅-锡合金(UNS L54000~L55099)	
铅-锡合金(<1.0%Sn)	L54000~L54099
铅-锡合金(1.0%~1.99%Sn)	L54100~L54199
铅-锡合金(2.0%~3.99%Sn)	L54200~L54299
铅-锡合金(4.0%~7.99%Sn)	L54300~L54399
铅-锡合金(8.0%~11.99%Sn)	L54400~L54499
铅-锡合金(12.0%~15.99%Sn)	L54500~L54599
铅-锡合金(16.0%~19.99%Sn)	L54600~L54699
铅-锡合金(20.0%~27.99%Sn)	L54700~L54799
铅-锡合金(28.0%~37.99%Sn)	L54800~L54899
铅-锡合金(38.0%~47.99%Sn)	L54900~L54999
铅-锡合金(48.0%~57.99%Sn)	L55000~L55099
铅-锶合金(UNS L55200~L55299)	
电池合金(0.06%~0.2%Sr,0.0%~0.03%Al,0.0%~0.08%Sn,0.0%~0.6%Ca,99%~99.8%Pb)	L55210，L55230，L55260
铅-锶合金(2%Sr,98%Pb)	L55290

①除非另有规定为“最低”或“余量”，否则所列成分代表名义值(或当多种合金代号归于同一组时为名义值的范围)。

工业纯牌号。四种(为重熔而制备的铸件)牌号的生铅的成分极限值都遵循 ASTM B29(表 3.7-2)的规定。这些牌号为：①低铋和低银的纯铅(最低99.995% Pb)，用于要求低铋和低银含量的化学用途；②精炼纯铅(最低99.97%Pb)，专用于铅酸电池用途；③纯铅(最低99.94%Pb)专用于一般用途；④化学铜铅(最低99.90%Pb)，专用于需防腐蚀和成形性的用途。生铅一般浇铸成质量约为50kg(110lb)的棒料，而块形(方形或长方形)的质量达1150kg(2530lb)，近年来用得日益广泛，特别是针对大用户。

表 3.7-2 ASTM B29 生铅的成分指标

铅种类	UNS 编号	化学成分①(质量分数,%)											
		Sb	As	Sn	Cu	Ag	Bi	Zn	Te	Ni	Fe	Pb	其他
低铋、低银纯铅	L50006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0010	0.0010	0.0015	0.0005	0.0001	0.0002	0.0002	99.995 最低	—
精炼纯铅	L50021	0.0005	0.0005	0.0005	0.0010	0.0025	0.025	0.0005	0.0001	0.0002	0.0001	99.97 最低	—
纯铅	L50049	0.001	0.001	0.001	0.0015	0.005	0.05	0.001	—	0.001	0.001	99.94 最低	0.002Sb+As+Sn
化学铜铅	L51121	0.001	0.001	0.001	0.040-0.080	0.020	0.025	0.001	—	0.002	0.002	99.90 最低	0.002Sb+As+Sn

①除非有规定范围或最小值，否则所列成分均为最大值。

工业纯牌号的带材、薄板或厚板产品形式均遵照ASTM B749 的规定。在该标准中，所规定的五种牌号的成分极限值如表3.7-3 所示。在美国生产的大部分铅都为纯(或腐蚀)铅(最低99.94% Pb)如表3.7-3 所示。所谓腐蚀铅，表示铅及其合金具有突出的耐腐蚀性，其名称并非指金属的性能而是指过去曾用过的一种工艺方法。腐蚀铅可用于制造颜料、氧化铅和其他种类繁多的化学物质。为了防止因为在工艺处理的过程中和过程后因杂质所造成的诸如在白色铅颜料中产生不该有的颜色之类的问题，必须要求其有很高的纯度。

表3.7-3　ASTM B749 规定的铅带材、薄板和厚板产品的化学成分指标

铅种类	UNS编号	化学成分[①](质量分数,%)							
		Ag	Cu	As + Sb + Sn	Zn	Fe	Bi	Th	Pb
腐蚀铅[②]	L50042	0.0015	0.0015	0.002	0.001	0.002	0.050	—	99.94 最低
普通铅	L50049	0.005	0.0015	0.002	0.001	0.002	0.050[③]	—	99.94 最低
化学铅	L51120	0.002-0.020	0.040-0.080	0.002	0.001	0.002	0.005	—	99.90 最低
含铜铅	L51121	0.020	0.040-0.080	0.002	0.001	0.002	0.025	—	99.90 最低
碲铅	L51123	0.020	0.040-0.080	0.002	0.001	0.002	0.025	0.035-0.060	余量

①除非有规定范围或最小值，否则所列成分均为最大值。　②Ag + Cu 的组合含量应不超过0.0025%。　③按购销双方协议，铋的含量可以高达0.150%。

在化学工业中，特别要求精炼铅含有0.04%~0.08%的残留铜和0.002%~0.02%的残留银，故称之为化学铅。美国产的化学铅大多是用含有少量铜和银的东南密苏里铅矿石精炼的。铜含量能显著改善耐腐蚀性和机械强度，从而使化学铅在应用方面成为仅次于腐蚀铅的牌号。银的含量在某些应用中也能提高其耐腐蚀性。

相对于化学铅，含铜铅能为大多数有高耐腐蚀性要求的用途提供防腐性。这种牌号是通过将铜加入经充分精炼的铅里而成的。它与化学铜的主要不同之处在于其有较高的含铋量。

比腐蚀铅含有更多银和铋的普通铅，都应用于电池氧化物及一般的合金熔合。

含0.035%~0.06% Te 的碲铅应用于要求有较高消声和/或防震能力的用途上。

铅基合金。因为铅是非常软和延展的，通常工业上都是以铅合金使用。锑、锡、砷和钙都是最常用的合金元素。

锑用于提高硬度和强度，如蓄电池铅板、薄板、管道和铸件。铅-锑合金中的锑含量从0.5%~25%，但通常为2%~5%。

在过去十年(指原著出版前——译者注)里，铅-钙合金在许多用途里代替铅-锑合金，尤其用于蓄电池铅板和铸件的用途。这些合金含有0.03%~0.15% Ca(例如表3.7-1 中的一些铅-钙合金)。更近年来，铝也被作为稳定剂，像钙一样地加入钙-铅和钙-锡-铅的合金里。

锡加入到铅或铅合金里能提高其硬度和强度，但是铅-锡较多的应用是由于其良好的熔化、铸造和润湿等特性，如用于活字合金和软钎焊料。锡能提高合金与金属，如钢和铜的润湿和粘结的能力，而非合金化铅的润湿性很差。锡与铅、铋或镉的组合构成了许多低熔点合金的主要组分。

砷铅(UNS L50310)用于电缆的包皮。砷常用于硬化铅-锑合金，主要用于生产圆形滴落颗粒。

铅的性能

虽然不同牌号的纯铅，UNS 编号从50001~50099(表3.7-1)的一般性能都基本相同，但含铅量低于99%的铅合金性能会有相当大的差异。据有关方面报道，铅合金的力学性能受许多因素的影响——如晶粒的大小、相分布以及冷、热加工的经历。文献很少有提供试验样件的全部数据及其试验步骤。经时效硬化和某种加工硬化的合金还会缺少一些时效的性能数据。由于铅的再结晶和熔化温度低，所以测定铅的性能值比测定熔点较高的铝、钢或铜的更加困难。

强度。在设计铅的零件时，必须随时考虑到铅的低抗拉强度(表3.7-4)和低蠕变强度(表3.7-5)。将铅作为结构材料使用的主要缺点还不在于其抗拉强度低，而是在于其对蠕变强度的敏感性。铅在低应力下也会发生连续变形，这种变形最终导致在远未达到其抗拉强度就发生了失效。

表 3.7-4 所选铅合金在室温下的典型拉伸性能

合金/状态	抗拉强度		伸长率①(%)	硬　度
	MPa	ksi		
腐蚀铅(L50042)/砂型铸造	12~13	1.7~1.9	30	3.2~4.5HB②
As-Pb 管道(L50310)/挤制和空冷	16.2	2.35	40	4.9HB
As-Pb (L50310)/挤制和水淬	20.6	3.0	35	6.6HB
Ca-Pb (L50750)/轧制带材③	70	10	10	—
铸造电池铅板(L50775)/完全时效和空冷	41~45	6.0~6.5	20~35	90~95HR④
高强度铸件(L50790)/完全时效和空冷	52~55	7.5~8.0	20~35	90~95HR④
化学铅(L51120)/轧制薄板	18~20	2.6~2.96	42~52	75~84HR④
硬铅 96-4 (L52901)/冷轧薄板(95%压缩)	27.5	4.0	48	8HB⑤
硬铅 96-4 (L52901)/热处理⑥	80	11.7	6.3	24HB⑤
重载电池铅板(L53230)/冷轧(95%压缩)	32	4.65	31	9.5HB⑤
重载电池铅板(L53230)/热处理⑦	85	12.35	4.7	26.3HB⑤
巴比特合金 7(L53585)/冷铸	72	10.5	4	22HB
20/80 软钎焊料(L54711)	40	5.8	16	11.3HB
30/70 软钎焊料(L54820)	34	4.9	18	12HB

①50mm(2in)长的伸长率，除非另有规定。 ②用 10mm 压球和在 100kg 载荷下延续 30s 的布氏硬度。 ③轧制带材的纵向性能。 ④类似于洛氏 R 刻度值的用于软材料的未规定的洛氏刻度值。 ⑤用1/16in 的钢球和 9.85kg 载荷延续 30s 的布氏硬度。 ⑥热处理为 235℃(455℉)淬火，再时效 150 天。 ⑦热处理为 235℃(455℉)淬火，再在室温里时效 1 天。

表 3.7-5 所选铅合金的蠕变特性

合　金	蠕变率特征			室温蠕变断裂特征		
	作用应力		最小蠕变率 10^{-4}%/h	作用应力		断裂时间/h
	MPa	ksi		MPa	ksi	
化学铅(L51120)	2	0.3	3.4 在 20℃(68℉)	—	—	—
砷铅(L50310)	2	0.3	0.15 在 24℃(76℉)	—	—	—
			0.36 在 43℃(110℉)	—	—	—
			2.0 在 65℃(150℉)	—	—	—
轧制钙-锡-铅(L50750)	—	—	—	28	4	50
	—	—	—	21	3	500
轧制钙-锡-铅(L50750)	6.9	1.0	0.06 在 20℃(68℉)	28	4	1000
1% Sb(L52605)挤制电缆包皮	4.5	0.65	0.1 在 0℃(32℉)	—	—	—
	2.4	0.35	0.1 在 30℃(86℉)	—	—	—
	1.0	0.15	0.1 在 66℃(150℉)	—	—	—
冷轧 6% Sb(L53105)薄板	2.8	0.4	0.1 在 30℃(86℉)	—	—	
	0.34	0.05	0.1 在 100℃(212℉)	—	—	—
冷轧 8% Sb(L53230)薄板	2.9	0.425	0.1 在 30℃(86℉)	—	—	—
电缆包皮合金(L54030)	—	—	—	5.0	0.725	1200

（续）

合　金	蠕变率特征			室温蠕变断裂特征		
	作用应力		最小蠕变率	作用应力		断裂时间/h
	MPa	ksi	$10^{-4}\%/h$	MPa	ksi	
10/90 软钎焊料(L54520)	—	—	—	3.5	0.5	1000
				1.1①	0.16①	1000①
30/70 软钎焊料(L54820)	0.79	0.115	0.01/天在20℃(68℉)	—	—	—
40/60 软钎焊料(L54915)	—	—	—	2.1	0.3	1000
软钎焊料(40C, ASTM B32,或 L54918)	—	—	—	0.6①	0.09①	1000①

①在100℃(212℉)。

铅的低强度并不一定会妨碍其应用。铅产品可以设计成自支承式的，或为其提供其他材料的嵌入件或支承件。与其他金属特别是钙或锑熔成合金，是在许多用途里提高铅强度的一种常用方法。一般应当要考虑采用铅覆盖的钢带支承的结构件。在由一种较强材料制成的结构件上用铅作为衬里时，该衬里通过粘结在结构件上得到支承。随着这种粘结和粘合技术的改进，铅与其他材料如砖、钢、木及混凝土制成各种复合材料。由此，这种通常称为铅系列复合材料的强度大为改善，并依旧保持所需要的铅的特性。

疲劳性能。因为铅和铅合金即使在室温下也对蠕变很敏感，所以铅基合金的疲劳性能会受蠕变-疲劳相互作用的影响。蠕变对疲劳寿命的影响是通过频次作用而产生的。较低的循环频次与疲劳寿命的减少相关。

疲劳寿命为10^7循环周数的应力极限值的一般范围从腐蚀铅(UNS L50042)的大约3MPa(0.435ksi)到在冷铸条件下的铅巴氏(巴比特)合金(ACSTM B23)的大约30MPa(4.35ksi)。

可锻性、软度和润滑性。这是铅的三种之所以能在许多用途中得到广泛应用的性能。例如铅，正是由于其可锻性才能作为一种填堵材料得以应用，使之将接头的缝隙完全填满。铅的软度和自润滑特性使其能应用于轴承合金、垫片和垫圈的一些重要零件上。铅成为线材和薄板的镀层还发挥拉深润滑剂的作用，作为铅粉末能用于使发动机轴承所用的防咬合剂及其轴承的润滑性得到改善。铅的可锻性在应用上的最大优势就是制造箔片，铅箔通常能轧制厚度薄至0.01mm(0.0005in)。

另一方面，铅的软度要求在许多应用的设计中要多加小心。例如，如果在系统设计中没有采取适当的预防措施，铅管道中过高的蒸汽速度会造成严重的腐蚀。

热膨胀。铅的相对较高线膨胀系数(纯铅，29.3μm/m/K或16.3μin/in/℉)是又一个重要的设计参数。当使用铅的屋面和围板时，必须要考虑到它们的热膨胀。通过使用小张的薄板及其依次间的松动扣接使得无论单张还是累积的膨胀都尽可能的小。在要经受很大的温度变化范围的管道中，必须要有保证它们能自由膨胀的一定间隙。这种极佳的柔性是铅在这类系统设计中使用的一个优点。

挤制特性。铅和铅基合金能表现出很高的塑性，且易于挤制加工。合金元素的加入会增加所要求的挤制力，但是在采用这种工艺的过程中，使用加热到最高温度约为230℃(450℉)的坯料，则不会有什么困难的。其主要应用包括管道、线材、管材、军火弹药和电缆包皮。用于包皮的砷铅(UNS L50310)的一般挤制温度应约为200~230℃(400~450℉)。

浇铸温度和冷却速率。这会明显影响铅合金的显微组织和性能。因为使用过分热的铸型而导致浇铸温度高和冷却速率低，从而造成偏析和粗大显微组织的形成。粗大的显微组织又会造成脆性、低压缩强度和低硬度。

铸造温度。用于不同铅合金的铸造温度为：

- 420~445℃(790~830℉)，用于化学铅(UNS L51120)；
- 400℃(750℉)，用于砷铅(UNS L50310)；
- 425~500℃(800~930℉)，用于1% Sb铅(UNS L52605)，4% Sb铅(UNS L52901)，6% Sb铅(UNS L53105)，8% Sb铅(UNS L53230)；
- 325~400℃(617~750℉)，用于铅巴比特合金7和13，按ASTM B23(UNS合金分别为L53581和合金L53346)；
- 480~540℃(900~1000℉)，用于铅巴比特合金

15，按 ASTM B23(UNS 合金为 L53620)；

- 340～425℃(645～800℉)，用于铅巴比特合金 8，按 ASTM B23(UNS 合金为 L53565)。

再结晶温度。铅的再结晶温度低于0℃(32℉)。

产品和应用

电池铅板。粗铅和二次铅(回收铅)的主要应用是铅酸蓄电池。美国将近 85% 的铅消耗在电池用途。铅酸电池是由一系列铸造或锻压制成的正、负铅合金铅板构成的，这些铅板上有氧化铅混合物的镀层并浸没在浓硫酸电解溶液中。

电池工作寿命的长短取决于铅合金板在硫酸中在反复交替(充电和放电)作用下的耐腐蚀和耐腐蚀蠕变的能力。可以用不同的合金制造铅板，包括含锑量从0.5%～6%的铅-锑合金和含钙量约0.06%～0.12%的铅-钙合金。将纯铅作为铅板的应用很有限，因为它特别软且容易发生严重的腐蚀蠕变。

锑能提高铅的强度。然而，由于锑会降低铅的氢气过电压，故在正常充电电压下，电池会开始放气(氢气从负极铅板上逸出)，以此造成电解液的水分损耗。为减少这种水分损耗，一般的趋势是降低铅板中锑的含量至1%或更低。随着锑含量的降低，合金变软和晶粒变大，从而导致强度降低和更严重的晶间腐蚀。工业上设法使用晶粒细化剂如碲来克服这种晶间腐蚀的问题。尽管如此，现代设计正在摒弃使用锑合金，因为最近的研究提出即使是低锑合金，电池的水分损耗也比锻压铅-钙铅板多出高达六倍。

铅-钙合金就像纯铅有极高的氢气过电压，这是电池所需要的特性。大部分的汽车工业目前都使用带铅-钙板的电池，即所谓的无保养电池，因为对于这种铅板，水的损耗与腐蚀蠕变的问题已降到最低限度。铅-钙-锡合金含有 0.2%～1.5% Sn，它也用于改善电池的性能，甚至能提供更好的耐腐蚀性和耐铅板的劣化。添加少量的铝(50～200ppmAl)将有助于减少晶间腐蚀，因为这能促使硬化析出物的均匀分布，而不是像无铝的铅-钙合金那样发生晶界析出。

经过晶粒细化(<3μm)的铅板显微组织、铅板合金的超力学性能(室温下的极限抗拉强度>45MPa或6500psi)以及消除有害的微量元素，都使这种设计良好的电池获得令人满意的耐腐蚀性。乘用车上用的无保养电池一般能延续3～7年的使用寿命。尽管如此，铅酸电池的铅板耐腐蚀性仍是延长电池寿命的一个热门研究领域。含铝 Pb-Ca-Sn 合金的开发成功，已经使高质量无保养电池的制造变得更为容易。

活字合金。这是一种用于印刷工业的金属，一般用 Pb-Sb-Sn 合金制成。加入少量的铜可以在某些用途中提高其硬度。铅基具有低成本、低熔点和易于铸造等活字金属所需要的特质。锑的加入能硬化合金，使之更加耐压力冲击和耐磨，并能降低铸造温度以及使凝固过程中的收缩减小到最低限度。锡能提高其流动性，改善可铸造性，降低脆性，并且使之形成更细的组织——有助于活字重复生成细微的细节。

不同的印刷工艺(制电版、制铅版、赉诺排铸、单字排铸和活字排铸)要求有不同的活字特征，因而要分别使用不同的合金。例如制电版有相对较低的合金含量(2.5%～4% S 和 2.5%～3% Sb)，因为它并不要求耐磨；而赉诺排铸(3%～5% Sn 和 11%～12% Sb)，制铅版(6%～8% Sn 和 13%～15% Sb)，以及单字排铸(7%～12% Sn 和 15%～24% Sb)的合金含量逐渐增加，依次提高硬度和耐磨性。活字排铸不需要重熔就能重复使用，它在铸型中承受高压，故含有 1.5%～2% Cu，以此获得甚至更高的硬度。活字排铸合金还含有 12%～20% Sn 和 20%～25% Sb。

电缆包皮。铅包皮是缠绕动力电缆或通信电缆挤压而成的，它能长期保护电缆不受潮湿和腐蚀的损坏，还能为绝缘提供保护。含有1%锑的化学铅和砷铅都是在此类用途中最为常用的。在铅里加入锑能提高其刚性，以利于在高架电缆上的应用。而加入的砷能提高其抗弯曲和蠕变的能力，这是一些有强烈振动的用途所需要的。含有 0.03% Ca 或碲的铅合金也能在此用途中获得满意的结果。

屏蔽和抗震。铅的高密度并结合其极佳的吸附特性，使其能够有效地屏蔽 X 射线和 γ 辐射。作为辐射屏蔽铅薄板广泛应用于一些医学和工业设施上。

高密度、高柔性(低刚性)和高抗震性的结合，使铅成为一种能消声和为设备和结构隔绝机械振动的优良材料。用于这方面用途的材料包括：①铅薄板，单独或作为不同基体材料的叠层而使用；②铅发泡复合材料——铅薄板夹层于聚氨基甲酸酯发泡剂的中间；③铅塑料薄板——装有铅的乙烯基或氯丁橡胶薄板；④装有铅的环氧树脂胶或尿烷；⑤铅-玻璃纤维夹层复合材料。

薄板。铅薄板作为化学及其相关工业的一种结构材料有其独特的重要性，因为铅能耐很大范围内的化学物质的侵蚀(如见后面“耐腐蚀性”中的讨论)。铅薄板也是用于屋面和围板、承水盘以及地板的建筑结构材料。用于化学工业和建筑结构上的薄板是采用纯铅或6%锑铅制造的。钙-铅和 Ca-Pb-Sn 合金也适用于许多这类用途。

管道。通过挤压很容易制造铅和铅合金的无缝管

道。铅管由于其耐腐蚀性和柔韧性而在化学工业和过去的管道及供水分配系统中得到许多应用。这种用途所用的管子材料都是化学铅或6%锑铅。其大小范围从细管材一直到直径300mm(12in)或以上的管道，其壁厚几乎不受任何限制。

软钎焊料。作为锡-铅系统的软钎焊料，属于应用最为广泛的连接材料。锡-铅软钎焊料的低熔点温度范围使它们能以简便的方法连接大部分的金属，而且极少甚至不会让热敏感零件产生损坏。锡-铅软钎焊料合金可以通过在低至182℃(360℉)和高至315℃(600℉)的温度中熔炼获得。除了纯金属和63% Sn和37% Pb的共晶软钎焊料以外，所有的锡-铅软钎焊料合金都是在随其合金成分而不同的温度范围里进行熔炼的。

工业软钎焊料合金包括很大的不同材料组合，根据特定用途的要求从100% Pb到100% Sn。当我们指称锡-铅软钎焊料时，习惯上将锡含量放在最前面——例如40/60指的是40% Sn和60% Pb。下面将要介绍锡-铅软钎焊料的应用。有关锡-铅软钎焊料的进一步内容包括其成分极限值和熔炼特征，可以参阅本手册的“连接”一章。

含量低于5% Sn的软钎焊料适用于对预镀容器的密封、金属的镀层和连接，以及使用温度超过120℃(250℉)的一些用途里。在这种温度下，软钎焊料主要起一种密封剂的作用。10/90、15/85和20/80软钎焊料用于密封蜂窝状的汽车散热器，还能用于填补汽车车身上的沟缝和凹坑。40/60和50/50为一般用途的软钎焊料。它们一般用于钎焊汽车散热器芯、电器和电子接头以及屋面沟缝和加热单元。白铁工的擦拭焊料(含有20%~25% Sn的铅基软钎焊料)过去曾用于水管，但现在由于健康的原因已不再允许使用。

还有一些含有别的合金成分如锑和银的其他软钎焊料。在电子工业，将银加入锡-铅焊料里，能减少银从银合金的镀层中溶解出来。银的加入还能提高其抗蠕变性。锡-银-铅合金能表现出良好的抗拉、蠕变和抗剪强度。有些在后续的软钎焊工序中，用于较高温度的钎接。在软钎焊料中，加入银能提高疲劳性能。含有1% Sn和1.5% Ag的铅软钎焊料能用于深冷设备，因为它不会在低温中发生脆化。

轴承合金。用于滑动轴承用途的铅基合金，也就是所谓的铅基巴氏合金。符合ASTM B23规定的这些合金包括合金7(75Pb-15Sb-10Sn)、合金8(80Pb-15Sb-5Sn-0.5As)、合金13(84Pb-10Sb-6Sn)和合金15(84Pb-15Sb-1Sn-1As)。具有较高强度的砷巴比特合金，则广泛用于汽车工业和柴油发动机的制造。

铅基电镀覆盖层也是用于轴承用途上的。其例子包括SAE合金191(90Pb-10Sn)，合金192(88Pb-10Sn-2Cu)、合金193(80Pb-18Sn-2Cu)和合金194(93Pb-7In)。有关铅巴比特合金和铅基覆盖层的进一步内容可参阅本手册“特种用途材料”一章。

军火弹药。大量的铅应用于军事和运动用途上所用的弹药。用于弹头的合金含有高达8% Sb和2% As，而用于弹芯的合金含有高达2% Sb。

其他用途。除了以上所述的一些用途之外，铅和铅合金还能用于：

- 镀铅锡钢板(Terneplate)(以不同的热浸镀工艺连续地在碳钢薄板上镀以锡铅合金，即terne metal——一种含有3%~15% Sn的铅合金)。
- 铅箔，即一般所谓的复合箔，在建筑业中用于防潮，以及应用于电子工业的铅-锡复合箔。
- 易熔合金(含有铅、铋、锡、镉、铟或其他元素不同组合的低熔点合金)
- 电解沉积和电镀的阳极(表3.7-1的铅-银和铅-钙分类)和在海水阴极保护中用于阳极的Pb-2Ag或Pb-1Ag-6Sb合金。

耐腐蚀性

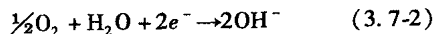
铅在大气、水和很大范围的常用化学物质中具有很高的耐腐蚀性。当耐腐蚀性必须与长使用寿命相结合时，一定要在其最终设计中慎重考虑由铅的力学性能所引起的局限性。

铅腐蚀的原理。铅在水电解液中的腐蚀是一种电化学过程。金属作为金属阳离子进入阳极区域的溶液里或通过阳极转变而成为固体化合物。这两种反应都能用以下反应表示：



$$Pb - 2e^- \rightarrow Pb^{2+} \quad (3.7\text{-}1)$$

这个发生在阳极区域的氧化反应，会伴有某些组分在电解液里阴极区域发生的一种还原反应。在中性盐溶液中的阴极反应就是溶解氧的还原：



$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- \quad (3.7\text{-}2)$$

在无氧酸溶液中，相应的阴极反应为：



$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (3.7\text{-}3)$$

腐蚀速率是在腐蚀微电池里的阴极和阳极之间流动电流的函数。有许多因素和条件会触发和影响这种电流的流动。在单一金属如铅的腐蚀中，会因为夹杂物、不均匀性、应力变化以及温度差而形成局部的阳极和阴极。在双金属(电化学)腐蚀中，在不同金属上形成阳极区和阴极区，而且较为活跃的金属(阳极)优先于较为惰性的金属(阴极)发生腐蚀。

在大多数的介质里，铅是相对于钢、铝、锌、镉

和镁的阴极，因此将加速这些金属的腐蚀。相对于钛和钝化不锈钢，铅是微电池的阳极，故遭受加速侵蚀。无论上述何种情况，腐蚀速率都是受控于两种金属间的电位差、它们的面积比以及它们的极化特征。

铅的腐蚀速率通常是由阳极控制的，因为最重要的决定因素是在阳极区域生成的腐蚀生成物的溶解度和其他物理特征。大部分的这些生成物都是相对不溶解的铅盐，它们作为一种不透水的薄膜沉积在铅的表面，而这种薄膜倾向于抑制进一步的侵蚀。这种不溶解保护膜的形成促成了铅对硫酸(H_2SO_4)、铬酸(H_2CrO_4)以及磷酸(H_3PO_4)的高耐腐蚀性。

一般而言，造成保护膜损坏的任何事情都会增加腐蚀的速率。而有利于建立或强化这种膜的因素都能降低腐蚀的速率。因此，受铅保护的设备寿命可以获得延长，例如使用能形成膜的含有硫酸盐、碳酸盐或硅酸盐水溶液对设备进行清洗。当铅同与之无法形成保护膜的腐蚀剂相接触时，建议采用这种方法保护铅。

在水中的腐蚀。长期的使用经验和实验室的试验都表明，铅在多种不同水中的腐蚀速率都是十分低的。一般来说，在天然和家庭用水中的腐蚀速率取决于水的硬化程度。水的硬度主要是由水里的钙盐和镁盐所决定的。这种盐至少要以中等数量(>125ppm)的存在，才能在铅上形成足以保护它不受腐蚀性侵蚀的膜。存在于水中的硅酸盐会增加水的硬度和膜的保护值。与之成对照的是，硝酸盐和氯化物的离子不是干扰保护膜的形成就是将其穿透，故会加重腐蚀。

含相当量 CO_2 和氧的某些纯水和天然软水，会成为无法用铅进行保护的场合，故不能将铅作为处置饮用水的管道和容器使用。这个污染问题限制了铅在这些用途中的应用，虽然从使用的角度看，腐蚀速率为忽略不计。

表 3.7-6 列出在几种工业和家庭用水中的化学铅(99.9% Pb)的腐蚀速率。应当指出，即使水的硬度低于125ppm，其腐蚀速率还是相对较低的。淡水的腐蚀速率也包括在表 3.7-7 的天然水数据中。

表 3.7-6　化学铅在工业和家庭用水中的腐蚀

水的类型	温度		通风	搅拌	腐蚀速率	
	℃	℉			μm/a	mil/a
蒸汽冷凝，微量酸	21~38	70~100	无	慢	21.59	0.85
矿物水						
pH8.3，110-ppm 硬度	20	68	是	慢	6.60	0.26
160-ppm 硬度	19	67	是	慢	7.11	0.28
100-ppm 硬度	22	72	是	慢	6.35	0.25
冷却塔水，充氧，取自伊瑞湖	16~29	60~85	完全	无	134.6	5.3
洛杉矶水管水，经氯气和硫酸铜处理	环境温度		—	150mm/s (0.5ft/s)	9.65	0.38
经铬酸盐处理的喷洒冷却水	16	60	是	—	9.4	0.37

表 3.7-7　铅在天然水中的腐蚀

水的地区和类型①	试验类型	搅拌	腐蚀速率		参考文献
			μm/a	mil/a	
布里斯多海峡；海水	浸没大约93%时间	—	12.7	0.50	[1]
南安普顿码头；海水	半潮高	—	2.79	0.11	[2]
巴拿马，格顿湖；热带淡水	浸没	无	2.03	0.08	[3]
福塔梅多，CZ；热带太平洋	浸没	流动②	9.14	0.36	
福塔梅多，CZ；热带太平洋	平均潮高	流动②	5.08	0.20	
旧金山港；海水	平均潮高	流动	10.67	0.42	
乎尼姆港，CA；海水	浸没	流动③	5.59	0.22	[4]
奎尔海滩，NC；海水	浸没	—	15.24	0.60	

①CZ，原来的水渠区。　②150mm/s(0.5ft/s)。　③ 60mm/s(0.2ft/s)。

大气腐蚀。以其大部分形式存在的铅都能在所有各种类型大气，如工业、乡村和海洋的暴露中表现出一致的耐用性(表3.7-8)。

表3.7-8 铅在不同的户外自然大气中的腐蚀

地区	大气类型	试验持续年数	铅种类	腐蚀速率		参考文献
				μm/a	mil/a	
Altoona, PA	工业的	10	化学	0.737	0.029	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.584	0.023	[5]、[6]
New York City	工业的	20	化学	0.381	0.015	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.330	0.013	[5]、[6]
Sandy Hook, NJ	海滩的	20	化学	0.533	0.021	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.508	0.020	[5]、[6]
Key West, FL	海滩的	10	化学	0.584	0.023	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.559	0.022	[5]、[6]
LaJolla, CA	海滩的	20	化学	0.533	0.021	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.584	0.023	[5]、[6]
State College, PA	乡村的	20	化学	0.330	0.013	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.356	0.014	[5]、[6]
Phoenix, AZ	半干燥	20	化学	0.102	0.004	[5]、[6]
			Pb-1Sb	0.308	0.012	[5]、[6]
Kure Beach, NC (25m, or 80 ft site)	东海岸，海洋的	2	化学	1.321	0.052	[7]
			Pb-6Sb	1.041	0.041	[7]
Newark, NJ	工业的	2	化学	1.473	0.058	[7]
			Pb-6Sb	1.067	0.042	[7]
Point Reyes, CA	西海岸，海洋的	2	化学	0.914	0.036	[7]
			Pb-6Sb	0.660	0.026	[7]
State College, PA	乡村的	2	化学	1.397	0.055	[7]
			Pb-6Sb	0.991	0.039	[7]
Birmingham, England	城市的	7	99.96% Pb	0.939	0.037	[8]
			Pb-1.6Sb	0.102	0.004	[8]
Wakefield, England	工业的	1	99.995% Pb	1.879	0.074	[8]
Southport, England	海洋的	1	99.995% Pb	1.778	0.070	[8]
Bourneville, England	城郊的	1	99.995% Pb	1.956	0.077	[8]
Cardington, England	乡村的	1	99.995% Pb	1.422	0.056	[8]
Cristobal, Panama	热带，海洋的	8	化学	1.346	0.053	[3]
Miraflores, Colombia	热带，海洋的	8	化学	0.762	0.030	[3]

地下管道上的腐蚀。铅作为包皮广泛应用于动力和通信电缆上，这是因为它具有不透水性和在各种各样土壤条件中的耐腐蚀性。电缆直接埋于地下或者装在管道或导线管中。在美国，常用的方法是将电缆铺设在用像水泥、陶土或木材的一些材料制成的管道或导线管中。

铅在地下使用(在管道或直接在土壤中)过程中，发生严重的腐蚀是罕见而不符合常规的。但是由于其

地下零件的维修和更换是困难且昂贵的，因而在所有的地下使用中都建议采用适当的防腐蚀保护。

土壤中的腐蚀。土壤的物理和化学性质变化繁多，故其腐蚀作用亦然。参考文献[9]总结了土壤的特征和性质。

表3.7-9所列的数据表明铅在大多数的土壤中的平均腐蚀速率都是很低的——从每年低于2.5～10μm(0.1～0.4mil)。不过应当指出的是，在地下腐蚀条件下点蚀深度的测量参数是比腐蚀速率更为重要。

表3.7-9　铅合金在不同的土壤中的腐蚀(最长暴露时间:11年)

土壤种类	化学铅①				碲铅②				锑铅③			
	腐蚀速率		最大点蚀深度		腐蚀速率		最大点蚀深度		腐蚀速率		最大点蚀深度	
	μm/a	mil/a	μm	mil	μm/a	mil/a	μm	mil	μm/a	mil/a	μm	mil
塞西尔粘壤土	<2.54	<0.1	457	18	<2.54	<0.1	406	16	<2.54	<0.1	229	9
黑格斯唐壤土	<2.54	<0.1	787	31	<2.54	<0.1	762	30	<2.54	<0.1	406	16
查尔斯湖粘土	7.62	0.3	2540	100	10.16	0.4	2718	107	10.16	0.4	2642	104
腐殖土	7.62	0.3	1321	52	7.62	0.3	1346	53	7.62	0.3	1295	51
卡利舍尔腐殖土	5.08	0.2	508	20	5.08	0.2	533	21	2.54	0.1	305	12
瑞夫尔泥炭土	<2.54	<0.1	838	33	<2.54	<0.1	584	23	<2.54	<0.1	711	28
夏基粘土	7.62	0.3	1778	70	7.62	0.3	1854	73	10.16	0.4	2261	89
索斯奎黑那粘土	<2.54	<0.1	864	34	2.54	0.1	1016	40	2.54	0.1	356	14
泰德尔沼泽土	<0.25	<0.01	305	12	<0.25	<0.01	203	8	<0.25	<0.01	152	6
道克斯粘土	<2.54	<0.01	635	25	<2.54	<0.1	432	17	<2.54	<0.1	483	19
奇诺淤泥壤土	<2.54	<0.1	381	15	<2.54	<0.1	508	20	<2.54	<0.1	178	7
莫黑夫细砂砾粘土	<2.54	<0.1	610	24	<2.54	<0.1	584	21	2.54	<0.1	406	16
渣土	7.62	0.3	2159	85	7.62	0.3	1549	61	10.16	0.4	1168	46
莫塞德淤泥壤土	<2.54	<0.1	610	24	<2.54	<0.1	406	16	<2.54	<0.1	229	9

①0.056%Cu，0.002%Bi，0.001%Sb。②0.08%Cu，0.01%Sb，0.043%Te。③0.036%Cu，5.3%Sb，0.016%Bi。
引自：参考文献[9]。

耐化学物质。铅之所以能对种类繁多的化学物质具有最佳的耐腐蚀性是由于铅腐蚀生成物所形成的相对不溶解表面膜所造成的局部阳极极化作用(参考文献[10])。其保护程度取决于这种膜的密实度、粘着性和溶解度。表3.7-10给出了化学铅对于特定腐蚀剂的耐腐蚀性的一般性描述。

表3.7-10　化学铅对特定腐蚀剂的耐腐蚀性

腐蚀剂	耐腐蚀性	腐蚀剂	耐腐蚀性
丙酮	耐腐蚀	酸	
乙炔气	耐腐蚀	硝酸④	中等的一般侵蚀
酸		磷酸⑤	耐腐蚀
乙酸①	中等的一般侵蚀	硫酸⑥	耐腐蚀
铬酸	耐腐蚀	亚硫酸	耐腐蚀
柠檬酸	中等的一般侵蚀	酒石酸	中等的一般侵蚀
盐酸②	中等的一般侵蚀	空气	耐腐蚀
氢氟酸	耐腐蚀	醇	
混合酸③	耐腐蚀	乙醇	耐腐蚀

（续）

腐　蚀　剂	耐 腐 蚀 性	腐　蚀　剂	耐 腐 蚀 性
醇		醇	
甲醇	耐腐蚀	氯化镁	严重的一般侵蚀
硫酸铝	耐腐蚀	硫酸镁	耐腐蚀
氨⑦	耐腐蚀	汽车燃料	耐腐蚀
叠氮化铵	耐腐蚀	硫酸镍	耐腐蚀
氯化铵⑧	耐腐蚀	氧气	耐腐蚀
氢氧化铵	耐腐蚀	酚	耐腐蚀
磷酸铵	耐腐蚀	摄影溶液	一般耐侵蚀
苯	耐腐蚀	碳酸钠	耐腐蚀
溴⑨	耐腐蚀	氯化钠⑫	耐腐蚀
二氧化碳	耐腐蚀	氢氧化钠⑬	耐腐蚀
四氯化碳⑩	耐腐蚀	硫酸钠⑭	耐腐蚀
氯气⑪	耐腐蚀	二氧化硫⑮	耐腐蚀
染料	一般耐腐蚀	经氯处理的水	耐腐蚀
甲醛	中等的一般侵蚀	海水	耐腐蚀

①用于处置乙酸酐和冰乙酸。 ②一般不推荐使用。 ③在常温下含30% H_2O。 ④在正常温度下，超过80%的浓度。 ⑤在200℃(390℉)的温度下，浓度达80%。 ⑥室温下浓度达96%，或在220℃(430℉)的温度下浓度达85%。 ⑦除非在里面溶解钠或钾。 ⑧在常温下，浓度达10%。 ⑨当冷却且无酸时。 ⑩在常温下。 ⑪潮湿至110℃(230℉)或干燥。 ⑫在常温下的稀溶液。 ⑬浓度达26%和80℃(175℉)。 ⑭浓度达10%并沸腾。 ⑮潮湿至200℃(390℉)或干燥。

参考文献

[1] J.N. Friend, The Relative Corrodibilities of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys—Part 1—The Results of Four Years of Exposure in Bristol Channel, *J. Inst. Met.*, Vol 39, 1928, p 111–143.
[2] J.N. Friend, The Relative Corrodibilities of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys—Part III—Results of Three Years Exposure at Southampton Docks, *J. Inst. Met.*, Vol 48, 1932, p 109–120.
[3] B.W. Forgeson *et al.*, Corrosion of Metals in Tropical Environments, *Corrosion*, Vol 14, 1958, p 73t–81t.
[4] C.V. Brouilette, Corrosion Rates in Port Hueneme Harbor, *Corrosion*, Vol 14, 1958, p 352t–356t.
[5] G.O. Hiers and E.J. Minarcik, The Use of Lead and Tin Outdoors, *Symposium on Atmospheric Corrosion of Nonferrous Metals*, STP 175, ASTM, 1955, p 135–140.
[6] Report of Subcommittee VI of ASTM Committee B-3 on Atmospheric Corrosion Tests of Nonferrous Metals and Alloys, *ASTM Proc.*, Vol 44, 1944, p 224.
[7] Report of Subcommittee VI of ASTM Committee B-3 on Atmospheric Corrosion Tests of Nonferrous Metals and Alloys, *ASTM Proc.*, Vol 62, ASTM, 1962, p 216.
[8] J.N. Friend, The Relative Corrodibilities of Ferrous and Nonferrous Alloys—Part II—The Results of Seven Years Exposure to Air at Birmingham, *J. Inst. Met.*, Vol 42, 1929, p 149–155.
[9] M. Romanoff, "Underground Corrosion," NBS 579, National Bureau of Standards, April 1957, p 227.
[10] E.L. Littauer and H.C. Wesson, Lead and Lead Alloys, *Corrosion*, Vol 1, L.L. Shrier, Ed., John Wiley & Sons, 1963, p 4:68–4:85.

精选参考文献

- *Advances in Lead-Acid Batteries*, Vol 84–14, D. Pavlov, Ed., The Electrochemical Society, 1984.
- W.R. Cieslak, et al., Corrosion in Batteries and Fuel-Cell Powder Sources, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 1317–1323.
- A.T. Kuhn, Ed., *Electrochemistry of Lead*, Academic Press, 1979.
- W. Hoffman, *Lead and Lead Alloys*, 2nd ed., Springer-Verlag, 1979 (in English).
- *Properties of Lead and Lead Alloys*, Lead Industries Association, 1984.
- *Lead Chemicals: Applications*, International Lead Zinc Research Organization, 1993.
- *Lead for Corrosion Resistant Applications*, International Lead Zinc Research Organization, 1974.
- *Lead Oxide: Properties and Applications*, International Lead Zinc Research Organization, 1985.

第8章 镍和镍合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM手册》第13卷腐蚀，1987，641~657页；《ASM手册》第20卷材料的选用和设计，1997，393~396页。其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。另外还特别关注第2篇第8章中有关耐热用途里的镍基合金的阐述。

镍和镍基合金对于现代工业是极其重要的，因为它们具备承受包括腐蚀环境、高温、高压以及这些因素相组合的各种各样严酷的工况条件的能力。它们之所以拥有这种能力也是基于多种理由。纯镍是有塑性和韧性的，因为它一直高至熔点(1453℃或2647℉)都属于一种面心立方(fcc)的结构。因此，镍和镍合金都易于采用传统的方法进行制造——也是锻压、铸造和粉末冶金(P/M)产品可采用的方法——它们不会像包括钢在内的其他金属及其合金那样会发生从塑性到脆性的转变。镍具有在正常的大气、天然淡水和通风的无氧化酸中良好的耐腐蚀性，而且在苛性碱溶液中也有极佳的耐腐蚀性。所以镍具备非常有用的耐腐蚀性，并且它是开发能利用特定合金元素之独特性能的特种合金极好的基础材料。

由于镍对于许多合金元素都有大范围的固溶度，故镍合金的显微组织由fcc固溶奥氏体(γ)和能在里面形成弥散体和析出颗粒构成。镍能与铜生成一种完全的固溶体，而且与铁具有近乎完全的溶解度。它能溶解~35% Cr、20%的钼或钨以及分别为5%~10%的铝、钛、锰和钒等各种元素。所以具有韧性和塑性的fcc基体能溶解大量的各种能实现固溶硬化，并使其高耐腐蚀性和高耐氧化性相组合的元素。固溶硬化的程度跟镍与其他合金元素的原子大小差别有关，故而与溶质干扰位错运动的能力有关。当有铝留在固溶体中时，钨、钼、铌、钽和铝都是强的固溶硬化元素；钨、铌、钽和钼在温度高于0.6 T_m(T_m为熔点温度)时也会起作用，这时受控于弥散的蠕变强度是很重要的。铁、钴、钛、铬和钒都是较弱的固溶硬化元素。

最后，镍与某些镍中的合金元素之间能形成独特的金属间化合物相。例如铝和钛通常一起加入而成为时效硬化γ′析出物Ni_3(Al、Ti)。由此使之形成在高温和低温用途中均具有极高强度的合金。

采矿和冶炼

镍矿石。主要有两种类型的镍矿石：硫化物和氧化物。硫化物矿石是利用典型的“硬岩”采矿法从有开采率的地下矿藏里开采得到的最普通矿石。采用露天矿开采非常少见。与之对照的氧化物矿石是从地表矿层利用传统的土方搬运法和设备直接进行挖掘的。因此，相对氧化物矿石而言，硫化物矿石的矿藏具有较高的成本特点。然而，硫化物矿石中的有价值组分容易进行富集处理，因此主要的冶炼镍都取自硫化物矿石。硫化物矿石经过开采和粉碎后，不难借助于浮选和磁性分离方法使镍、铜和铁的选矿得以分离，以此提高其矿石的品位。利用火法冶炼、湿法冶炼和挥发冶炼的工艺将选矿精炼成为单质金属。

火法冶炼工艺。选矿在焙烧炉里进行煅烧，然后在以煤或天然气为燃料的反射炉或类似的炉子里进行熔炼，再进入转炉里进行吹炼。通过对镍和铜选矿的进一步冶炼，将对日后的金属性能造成负面影响的那些元素降低到一个允许的水平上。这些要去除的元素包括锑、砷、铋、铜、铁、铅、磷、硫、锡和锌。如果从经济上分析合算，无论所去除这些元素是主要的还是次要的，都要回收。在硫化物矿石中所存在的微量贵重金属最终也得回收，这样才算完成整个冶炼/回收的过程。

湿法冶炼工艺。作为熔炼技术的替代，加压氨水浸出技术用于硫化镍矿石选矿的处理，在此之后，借助氢的还原使经冶炼的镍粉从浸出的溶液里析出。大气压下的氨水浸出也适用于从经焙烧和还原的富铁硫化物选矿中回收铁和镍。

电解工艺。电解冶炼和电解沉积两者都属于电解工艺，用于生产纯镍阴极薄板。在前一种工艺中，用被进行冶炼的粗镍扁锭(阳极)与很薄的镍原始薄板(阴极)构成一个镍电解冶炼电池，并使其浸没于电解水溶液里，于是让直流电通过电池。镍和某些杂质都溶解于电解液(阳极液)中。将溶液从电解槽里泵

出，并利用化学方法将杂质去除。经提纯的电解液再作为阴极电解液倒回电解槽中，并成为沉积在阴极上的纯镍。电解沉积也是一种电解工艺，它能电解可溶解的硫化镍阳极，或者利用不溶解的阳极从浸出溶液中提取镍。

挥发冶炼工艺。羰基工艺利用从气体到金属的转变从一种不纯的氧化镍中提取纯镍。在这个过程中，氧化物用氢气进行还原，而镍有选择性地与一氧化碳发生反应生成气态的羰基化镍。利用热使这种气体化合而得到纯镍。这就是已知最佳可行的冶炼镍的方法。所产出的粉末或球粒都具有极高的纯度，这种工艺具有很高的能量效率，而且其产品不会产生污染废弃物。

镍的应用

目前镍的应用趋势如下所列：

用　　途	镍的消耗(%)
不锈钢	62.7
镍基合金	11.9
镀镍	9.7
合金钢	9.0
铸造产品	3.5
铜基合金	1.4
其他	1.8

引自：镍业发展研究所。

不锈钢。以奥氏体300系列为主的不锈钢是镍的最大消耗品种。镍加入不锈钢可以提高成形性、焊接性、耐腐蚀性、高温下的强度和抗氧化性，还有低温韧性以及能通过冷变形加工保持其强度。

镍和镍合金。它们有广泛的用途，其主要特点是耐腐蚀性和/或耐热性。其中一些用途包括化工和石化工业中应用的零部件、污染控制设备、煤的气化和液化系统、纸浆和造纸厂使用的零件、飞机燃气轮机、发电厂汽轮机机组、往复式发动机中的燃气轮机增压器和阀门，电器和电子用途，以及热处理设备。镍合金还有许多其他的应用，包括特种合金的独特物理性质，如受控膨胀合金、电阻合金、软磁合金和形状记忆合金。在后面的段落里，讨论了镍和镍合金的成分、力学性能和耐腐蚀性。

镀镍。这主要用于装饰性涂层，尽管其在工业涂层和电铸沉积的应用也不少。镀镍的主要目的是改进外观、表面粗糙度、耐腐蚀性以及耐磨性。

合金钢。镍是许多合金钢中的重要组元成分，其含量可高达9%的。它还常与其他合金元素（如铬和钼）结合使用，以此形成最佳的硬度、强度、塑性、耐腐蚀性和工艺特性。镍能降低钢的塑性-脆性转变温度，故使含镍钢适用于液化气的储运和在零下温度下的机器和结构用途。

铸造产品。镍是耐热和耐腐蚀的铸造不锈钢的重要成分，其含量可达35%。它也应用于合金铸铁，奥氏体高合金灰铸铁和球墨铸铁含有15%～35% Ni。一些工程牌号的铸造低合金钢里也含有镍。

铜合金。一些具有耐腐蚀性、热导性和强度的铜-镍合金中含有10%～30% Ni，并因此应用于换热器，特别适用于海水环境中。镍还能用于镍银合金（含有高达25% Ni的Cu-Ni-Zn合金）以及一些铸造青铜中。

镍的其他用途。包括化学物质、盐类、催化剂、电池以及其他的多种用途。

镍和镍合金的分类

镍和镍合金如同不锈钢具有类别繁多的耐腐蚀性。然而，在固溶体中，镍比铁里能容纳更大含量的各种合金元素，主要为铬、钼和钨。因此镍基合金一般比不锈钢更能适用于严酷的环境中。事实上，由于镍能用于稳定某些高合金不锈钢中的奥氏体（fcc）相，故这种不锈钢与镍基合金之间的界线是相当模糊的。例如，用于金属与合金的统一编号系统（UNS）将以下的奥氏体不锈钢划分为镍合金：

材　　料	UNS 编号
20Cb3（Fe-35Ni-20Cr）	N08020
20Mo-4（Fe-37Ni-23Cr-4Mo）	N08024
20Mo-6（Fe-35Ni-24Cr-6Mo）	N08026
Al-6X（Fe-24Ni-21Cr-7Mo）	N08366

通常在用于高温强度的一般所称的超级耐热合金与主要用于耐腐蚀的合金之间有一个区分的。然而，这种区分并不是截然分明的，因为有一些超合金应用于需要耐腐蚀的用途中，也有一些耐腐蚀的合金应用于需要耐高温的用途中。许多具有高温强度的合金都是一些含有析出强化元素如铝、钛和铌的多相合金。它们还有较高含量的碳。大多数耐腐蚀合金基本上都是单相合金，它们可以主要通过冷变形加工进行强化。

锻压耐腐蚀合金

锻压耐腐蚀镍基合金的成分范围从工业纯一直到含有许多合金元素的复杂合金。表3.8-1列出了通常所用合金的成分。其代表性的力学性能数据如表3.8-2所示。

表 3.8-1 锻压耐腐蚀镍和镍基合金的成分

合金	UNS 编号	化学成分①(质量分数,%)							
		Ni	Cu	Fe	Mn	C	Si	Si	其他
工业纯和低合金镍									
镍 200	N02200	99.0 最小	0.25	0.40	0.35	0.15	0.35	0.01	—
镍 201	N02201	99.0 最小	0.25	0.40	0.35	0.02	0.35	0.01	—
镍 205	N02205	99.0 最小②	0.15	0.20	0.35	0.15	0.15	0.008	0.001 ~ 0.08Mg, 0.01 ~ 0.05Ti
镍 211	N02211	93.7 最小②	0.25	0.75	4.25 ~ 5.25	0.20	0.15	0.015	—
镍 212	—	97.0 最小	0.20	0.25	1.5 ~ 2.5	0.10	0.20	—	0.20Mg
镍 222	—	99.0 最小②	0.10	0.10	0.30	—	0.10	0.008	0.01 ~ 0.10Mg, 0.005Ti
镍 270	N02270	99.9 最小	0.01	0.05	0.003	0.02	0.005	0.003	0.005Mg, 0.005Ti
镍 290	N02290	余量	0.02	0.015	0.001	0.006	0.001	0.0008	0.001Al, 0.001Mg
杜拉镍 301	N03301	93.00 最小	0.25	0.60	0.50	0.30	1.00	0.01	4.00 ~ 4.75Al, 0.25 ~ 1.00Ti
镍-铜合金									
合金 400	N04400	63.0 最小②	28.0 ~ 34.0	2.5	0.20	0.3	0.5	0.024	—
合金 401	N04401	40.0 ~ 45.0②	余量	0.75	2.25	0.10	0.25	0.015	—
合金 404	N04404	52.0 ~ 57.0	余量	0.50	0.10	0.15	0.10	0.024	0.05Al
合金 R-405	N04405	63.0 最小②	28.0 ~ 34.0	2.5	2.0	0.3	0.5	0.25 ~ 0.060	—
合金 K-500	N05500	63.0 最小②	27.0 ~ 33.0	2.0	1.5	0.25	0.5	0.01	2.30 ~ 3.15Al, 0.35 ~ 0.85Ti

合金	UNS 编号	化学成分①(质量分数,%)												
		Ni	Cr	Fe	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	C	Mn	Si	B	其他
镍-铬-铁(-钼)合金															
合金 600	N06600	72.0 最小②	14.0 ~ 17.0	6.0 ~ 10.0	—	—	—	—	—	—	0.15	1.0	0.5	—	0.5Cu
合金 601	N06601	58.0 ~ 63.0	21.0 ~ 25.0	余量	—	—	—	—	—	1.0 ~ 1.7	0.10	1.0	0.50	—	1.0Cu
合金 617	N06617	44.5 最小	20.0 ~ 24.0	3.0	10.0 ~ 15.0	8.0 ~ 10.0	—	—	0.6	0.8 ~ 1.5	0.05 ~ 0.15	1.0	1.0	0.006	0.5Cu
合金 625	N06625	58.0 最小	20.0 ~ 23.0	5.0	1.0	8.0 ~ 10.0	—	3.15 ~ 4.15	0.40	0.40	0.10	0.50	0.50	—	—
合金 690	N06690	58.0 最小	27.0 ~ 31.0	7.0 ~ 11.0	—	—	—	—	—	—	0.05	0.50	0.50	—	0.50Cu
合金 718	N07718	50.0 ~ 55.0②	17.0 ~ 21.0	余量	1.0	2.8 ~ 3.30	—	4.75 ~ 5.50	0.65 ~ 1.15	0.20 ~ 0.80	0.08	0.35	0.35	0.006	0.30Cu
合金 725	N07725	55.0 ~ 59.0	19.0 ~ 22.5	余量	—	7.0 ~ 9.5	—	2.75 ~ 4.0	1.0 ~ 1.70	0.35	0.03	0.35	0.20	—	—

（续）

合金	UNS编号	化学成分①（质量分数，%）													
		Ni	Cr	Fe	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	C	Mn	Si	B	其他
铁-镍-铬（-钼）合金															
合金 800	N08800	30.0~35.0	19.0~23.0	39.5 最小	—	—	—	—	0.15~0.60	0.15~0.60	0.10	1.5	1.0	—	—
合金 800HT	N08811	30.0~35.0	19.0~23.0	39.5 最小	—	—	—	—	0.15~0.60	0.15~0.60	0.06~0.10	1.5	1.0	—	0.895~1.20Al+Ti
合金 825	N08825	38.0~46.0	19.5~23.5	22.0 最小	—	2.5~3.5	—	—	0.6~1.2	0.2	0.05	1.0	0.5	—	—
合金 925	N09925	38.0~46.0	19.5~23.5	22.0 最小	—	2.5~3.0	—	0.50	1.9~2.4	0.10~0.50	0.03	1.0	0.50	—	—
20Cb3	N08020	32.0~38.0	19.0~21.0	余量	—	2.0~3.0	—	1.0	—	—	0.07	2.0	1.0	—	3.0~4.0Cu
镍-铬-钼（-铁）合金或镍-钼合金															
合金 B	N10001	余量	1.0	6.0	2.5	26.0~33.0	—	—	—	—	0.12	1.0	1.0	—	0.60V
合金 B-2	N10665	余量	1.0	2.0	1.0	26.0~30.0	—	—	—	—	0.02	1.0	0.10	—	—
合金 B-3	N10675	65.0	1.0~3.0	1.0~3.0	3.0	27.0~32.0	3.0	0.20	0.20	0.50	0.01	3.0	0.10	—	0.20Ta
合金 C	N10002	余量	14.5~16.50	4.0~7.0	2.5	15.0~17.0	3.0~4.5	—	—	—	0.08	1.0	1.0	—	0.35V
合金 C-4	N06455	余量	14.0~18.0	3.0	2.0	14.0~17.0	—	—	0.70	—	0.015	1.0	0.08	—	—
合金 C-22	N06022	余量	20.0~22.5	2.0~6.0	2.5	12.5~14.5	2.5~3.5	—	—	—	0.015	0.5	0.08	—	0.35V
合金 C-276	N10276	余量	14.5~16.50	4.0~7.0	2.5	15.0~17.0	3.0~4.5	—	—	—	0.02	1.0	0.08	—	0.35V
合金 G	N06007	余量	21.0~23.5	18.0~21.0	2.5	5.5~7.5	1.0	1.75~2.5	—	—	0.05	1.0~2.0	1.0	—	—
合金 G-2	N06975	47.0~52.0	23.0~26.0	余量	—	5.0~7.0	—	—	0.70~1.5	—	0.03	1.0	1.0	—	0.70~1.20Cu
合金 G-3	N06985	余量	21.0~23.5	18.0~21.0	5.0	6.0~8.0	1.5	—	—	—	0.015	1.0	1.0	—	1.5~2.5Cn，0.50Nb+Ta
合金 G-30	N06030	余量	28.0~31.5	13.0~17.0	5.0	4.0~6.0	1.5~4.0	0.3~1.5	—	—	0.03	1.5	0.8	—	1.0~2.4Cu
合金 N	N10003	余量	6.0~8.0	5.0	0.2	15.0~18.0	0.5	—	—	—	0.010	1.0	1.0	0.010	0.50V，0.35Cu
Allcorr	N06110	余量	27.0~33.0	—	12.0	8.0~12.0	4.0	2.0	1.5	1.5	0.15	—	—	—	—

①除另有注明外，单个的值为最大值。 ②镍加钴的含量。

表3.8-2 所选镍基合金的室温力学性能

合金	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		伸长率，50mm(2in)长的伸长率(%)	弹性模量		硬度
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi	
镍200	462	67	148	21.5	47	204	29.6	109HB
镍201	403	58.5	103	15	50	207	30	129HB
镍205	345	50	90	13	45	—	—	—
镍211	530	77	240	35	40	—	—	—
镍212	483	70	—	—	—	—	—	—
镍222	380	55	—	—	—	—	—	—
镍270	345	50	110	16	50	—	—	30HRB
杜拉镍301(析出硬化)	1170	170	862	125	25	207	30	30~40HRC
合金400	550	80	240	35	40	180	26	110~150HB
合金401	440	64	134	19.5	51	—	—	—
合金R-405	550	80	240	35	40	180	26	110~140HB
合金K-500(析出硬化)	1100	160	790	115	20	180	26	300HB
合金600	655	95	310	45	40	207	30	75HRB
合金601	620	90	275	40	45	207	30	65~80HRB
合金617(固溶退火)	755	110	350	51	58	211	30.6	173HB
合金625	930	135	517	75	42.5	207	30	190HB
合金690	725	105	348	50.5	41	211	30.6	88HRB
合金718(析出硬化)	1240	180	1036	150	12	211	30.6	36HRC
合金C-22	785	114	372	54	62	—	—	209HB
合金C-276	790	115	355	52	61	205	29.8	90HRB
合金G3	690	100	320	47	50	199	28.9	79HRB
合金800	600	87	295	43	44	193	28	138HB
合金825	690	100	310	45	45	206	29.8	—
合金925①	1210	176	815	118	24	—	—	36.5HRC
20Cb3	550	80	240	35	30	—	—	90HRB

注：除另有注明外，均为退火薄板的性能。

①980℃(1800℉)退火30min，空冷然后760℃(1400℉)时效8h，以55℃(100℉)/h的速率炉冷，加热至620℃(1150℉)维持8h，空冷。

工业纯的镍牌号。从镍200~205都具有很强的耐多种介质腐蚀的能力，尤其是在还原介质中；但是在氧化的介质中它们也能保持其钝态的氧化镍表面膜。它们应用于化工和电子工业。它们可以在650~1230℃(1200~2250℉)的温度中热变形加工，在700~925℃(1300~1700℉)进行退火，并且能通过冷变形加工进行硬化。例如经过加工的薄板在退火状态下的拉伸性能(抗拉强度460MPa或67ksi、屈服强度148MPa或22ksi和伸长率47%)，通过冷轧提高到抗拉强度为760MPa(110ksi)、屈服强度为635MPa(92ksi)和伸长率为8%。由于名义0.08%C含量(最高0.15%)，镍200(UNSN02200)不应在高于315℃(600℉)的温度下使用，因为在425~650℃(800至1200℉)下，会由于石墨的析出而发生脆化。应用更为广泛的低碳合金镍201(UNS N02201)含最高0.02%C，能在高于290℃(550℉)的温度下使用。更高纯度的镍在工业上可用于各种电器的用途。

低合金镍。这是含有最低94%Ni的合金。在镍

211 中加入 5% Mn 的固溶体，能保护其在使用环境中不遭受硫的侵蚀。在 640 ~ 740℃（1185 ~ 1365℉）的温度里，即使含量低至 0.005% S，也会造成在非合金化镍的晶界上的液态脆化。杜拉镍(Duranickel)合金 301(Ni-4.5Al-0.6Ti)使具有工业纯镍的耐腐蚀性又因 γ′的析出而提高强度。合金 301 通过合金的充分加入而降低其居里温度，使合金在室温里有弱的铁磁性。

镍-铜合金。这是一种强而韧的合金，它们具有在不同介质包括海水和硫酸及其他酸中的耐腐蚀性，还能免于遭受氯离子的应力腐蚀。它们被应用于化工和污染控制设备。合金 K-500 是在名义上含有30% Cu 且本已具有的良好固溶强化和加工硬化特征的合金 K-400 的基础上，再加入 2.7Al-0.6Ti 的合金元素，使其能够析出 γ′的 $Ni_3(Al,Ti)$，从而使之再增添一种时效硬化的效果。通过调整这些合金的成分，能降低其居里温度至室温之下。

Ni-Cr-Fe(-Mo)合金。可以简单地认为，它是类似于铁基奥氏体不锈钢合金的一种镍基合金，只是铁和镍的含量作了一定的改变。在这类重要的工业合金中，铬的含量一般为 15% ~30%，而铁的含量为 3%~20%。鉴于这些合金保持良好的 Cr_2O_3 表面膜，在许多严酷环境中，它们都有极佳耐腐蚀性并免于发生氯离子的应力腐蚀开裂(SCC)。它们还具有高温下良好的耐氧化、硫化性及强度。这些富镍的 Ni-Cr-Fe 合金具有接近 1200℃(2200℉)的最高使用温度。合金 600 (UNS N06600，即 Ni-15Cr-8Fe)是一种能应用于从深冷温度到 1093℃(2000℉)温度的单相合金。其在退火状态有适中屈服强度(207 ~ 310MPa，或 30 ~ 45ksi)的带材能容易地通过冷轧进行加工硬化，以此达到屈服强度 827 ~ 1100MPa(120 ~ 160ksi)，并且能在高达 ~540℃(1000℉)温度下保持其大部分的强度。

Fe-Ni-Cr(-Mo)合金。这也是不锈钢技术的一种扩展。耐热铁镍铬(Incoloy)合金 800 作为上面所述的 Ni-Cr-Fe 系列材料中一种含镍量较低的产品而开发。它具有良好的耐氧化性，并且作为一种铠装材料用于电炉元件。800 合金系列还在高温石油化工的介质中得到了广泛的应用，这时含硫的原料(石脑油和重油，原文为 naptha，疑系 naphtha 之误——译者注)裂解成为其组成的馏分。它们不仅能抗氯离子的 SCC，而且还能抗连多硫酸的开裂(合金 801 具有最佳的抗力)。Fe-Ni-Cr 合金还有极好的高温强度(蠕变和应力断裂)。

Ni-Cr-Mo(-Fe)**合金**。它们包括一大族能应用于化工、污染控制和废物处理工业的合金，以此利用其优异的耐热和耐腐蚀性。在这个重要的工业家族中的合金如 C-276 和合金 625，正是由于其极佳的焊接特性和焊接构件的耐腐蚀性而使其在应用中有较大的适用性。在这种合金中加入钼，能提高其耐点蚀和缝隙腐蚀的能力。镍基合金(Hastelloy)B、B-2 和 B-3 的高钼含量(~28%)促使形成对盐酸及其他强还原化学物质的良好耐腐蚀性。

铸造耐腐蚀合金

镍基合金铸件广泛应用于处置腐蚀介质，并且由高合金铸造厂正规生产。一些主要合金按 ASTM A494 进行鉴别。此外，若干具有特殊专利的牌号常规定应用于一些严重腐蚀的用途。表 3.8-3 列出这些合金的分类和成分。其最低力学性能的要求如表3.8-4所示。一般来说，这些合金的生产优化了它们的耐腐蚀性，其次是它们的力学性能。就铸造而言，最为关注的性能是塑性。高的塑性促成了较好的焊接性，并适用于采用热处理。如果金属的成分没能得到适当的权衡，铸件就会因固溶退火和水淬而发生开裂。

除了某些高硅的和专利的牌号以外，铸造镍基合金都有与之相应的锻压牌号(表 3.8-3)，并且在由一种合金制造的锻造和铸造的两种零件所构成的系统里，往往采用铸造零件来说明铸造镍基合金。铸造和与之相应的锻造牌号之间的差别在于一些次要的元素，因为对于其锻造牌号，加工性是一个主要因素，而铸造性和致密性则是其铸造牌号的主要因素。但是两者在次要元素上的差别并不会造成使用上的明显差异。

镍基铸件最常用于液体处理系统，这时它们能同与之相应的锻造合金相媲美。它们还十分常见地用于泵和阀的元件上或者一些存在裂隙和高速影响的用途。同与之相应的锻造合金相比，一些铸件中的较高含硅量还具有超耐磨和抗拉伤的作用。鉴于其高成本，镍基合金通常仅选用于严酷的使用条件中，此时保持产品纯度是非常重要的，而一些成本较低的不锈钢或其他替代材料是很难适用的。

耐热合金(超合金)

耐热镍合金可以采用锻压、铸造和 P/M 等方法进行制造。超合金可以在严密控制的条件下铸造，由此产生为改善高温力学性能所要求的多晶体、细长(定向凝固)或单晶粒的组织。大部分的镍基超合金都利用了一种强化固溶奥氏体基体与 γ′析出的结合。富铌、时效硬化析出物 γ″(Ni_3Nb)使其易于热处理并具有焊接性，以此使合金 718 成为在航天和核的结

表 3.8-3 铸造耐腐蚀镍基合金的成分

合金	与之相当的锻压	化学成分(质量分数,%)									
		C	Si	Mn	Cu	Fe	Cr	P	S	Mo	其他
铸造镍											
CZ-100	—	1.0 最高	2.0 最高	1.5	1.25	3.0	—	0.03	0.03	—	—
镍-铜											
M-35-1	Monel400	0.35	1.25	1.5	26.0~33.0	3.50 最高	—	0.03	0.03	—	—
M-35-2	—	0.35	2.0	1.5	26.0~33.0	3.50 最高	—	0.03	0.03	—	—
M-30H	—	0.30	2.7~3.7	1.50	27.0~33.0	3.50 最高	—	0.03	0.03	—	—
M-25S	—	0.25	3.5~4.5	1.50	27.0~33.0	3.50 最高	—	0.03	0.03	—	—
M-30C	—	0.30	1.0~2.0	1.50	26.0~33.0	3.50 最高	—	0.03	0.03	—	1.0~3.0Nb
镍-铬-铁											
CY-40	Inconel600	0.40	3.0	1.5	—	11.0 最高	14.0~17.0	0.03	0.03	—	—
镍-铬-钼											
CW-12MW	Hastelloy C	0.12	1.0	1.0	—	4.5~7.5	15.5~17.5	0.04	0.03	16.0~18.0	0.20~0.40V, 3.75~5.25W
CW-6M	Hastelloy C (mod)	0.07	1.0	1.0	—	3.0 最高	17.0~20.0	0.04	0.03	17.0~20.0	—
CW-2M	Hastelloy C-4	0.02	0.8	1.0	—	2.0 最高	15.0~17.5	0.03	0.03	15.0~17.5	0.20~0.60V
CW-6MC	Inconel 625	0.06	1.0	1.0	—	5.0	20.0~23.0	0.015	0.015	8.0~10.0	3.15~4.50Nb
CY5SnBiM	—	0.05	0.5	1.5	—	2.0 最高	11.0~14.0	0.03	0.03	2.0~3.5	3.0~5.0Bi, 3.0~5.0Sn
CX2MW	—	0.02	0.8	1.0	—	2.0~6.0	20.0~22.5	0.025	0.025	12.5~14.5	2.5~3.5W, 0.35V 最高
CU5MCuC①	—	0.05 最高	1.0 最高	1.0 最高	1.5~3.5	余量	19.5~23.5	0.030 最高	0.030 最高	2.5~3.5	0.60~1.2Nb
镍-钼											
N-12MV	Hastelloy B	0.12	1.0	1.0	—	4.0~6.0	1.0	0.04	0.03	26.0~30.0	0.20~0.60V
N-7M	Hastelloy B (mod)	0.07	1.0	1.0	—	3.0 最高	1.0	0.04	0.03	30.0~33.0	—
专利牌号											
Chlorimet 2	—	0.07	1.0	1.0	—	2.0	1.0	—	—	30~33	—
Chlorimet 3	—	0.07	1.0	1.0	—	3.0	17~20	—	—	17~20	—
Hastelloy D	—	0.12	8.5~10	0.5~1.25	2~4	2.0	1.0	—	—	—	1.5Co
Illium 98②	—	0.05	1.0	1.0	5.5	—	28	—	—	8.5	—
Illium G②	—	0.20	1.0	1.0	6.5	5.0	22.5	—	—	6.5	—

①含有38.0%~44.0% Ni。②常规成分。

表 3.8-4 铸造耐腐蚀镍基合金的力学性能

合金	抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)	硬度HB
	MPa	ksi	MPa	ksi		
CZ-100	345	50	125	18	10	—
M-35-1	450	65	170	25	25	—
M-35-2	450	65	205	30	25	—
M-30H	690	100	415	60	10	243~294
M-25S	—	—	—	—	—	300 最小
M-30C	450	65	225	32.5	25	125~150
N-12MV	525	76	275	40	6	—
N-7M	525	76	275	40	20	—
CY-40	485	70	195	28	30	—
CW-12MW	495	72	275	40	4	—
CW-6M	495	72	275	40	25	—
CW-2M	495	72	275	40	20	—
CW-6MC	485	70	275	40	25	—
CX2MW	550	80	280	45	30	—
CU5MCuC	520	75	240	35	20	—

构件用途中最为重要的超合金。含有4.75%~5.50% Nb的合金718是一种高强度、耐腐蚀的合金，它的应用温度为-250~700℃(-423~1300℉)。有一些合金例如耐盐酸镍基合金(Hastelloy X)，用从碳化物的析出代替γ'，以期获得更大的强化。其他如MA754利用包含机械合金化的P/M技术，用以实现体积分数为~1%、非常细(25nm)的惰性氧化物颗粒如Y_2O_3的弥散析出，从而促成在较高温度下的抗拉强度和应力断裂强度。有关应用于耐热用途的镍基合金的更为详细的内容请参阅本手册“超合金”。

特种用途合金

还可以通过特殊用途的镍基合金来实现一些独特的特性组合。在前面阐述过的合金也在一定程度上具有这些特性，以下合金的开发则是为了促成它们相当独特的一些性能。有关这些材料的进一步详细内容可参阅本篇第14章。

有许多能应用于电阻加热元件的电阻合金。它们含有35%~95% Ni，但是都无一例外地含有15%以上Cr，以形成一种良好结合的表面氧化物，用于保护其在1000~2000℃(1850~2200℉)的空气里免遭氧化和渗碳。如Ni-20Cr(UNS N06003)，Ni-15Cr-25Fe(UNS N06004)以及Ni-20Cr-3Al-3Fe。这些合金都是单相奥氏体并且具有作为加热元件所需要的性能：要求高且能重现的电阻、低线膨胀系数，以使热疲劳和冲击降到最低程度、良好的蠕变强度以及加工所要求的强度和塑性。

镍的铁磁性使得以Ni-5Mo-16Fe为代表的镍基合金配方，能作为耐腐蚀性的软磁体在不同的用途中得到应用。由Fe-(36-52)Ni-(0-17)Co合金所表现的低热膨胀特征，使这种材料能适用于从玻璃与金属间的密封以及如用于液化天然气的储存设备。以合金903(Ni-42Fe-15Cu+Nb、Al、Ti)为代表的受控热膨胀合金也可通过γ'析出而硬化，并获得能应用于温度高达~650℃(1200℉)下的高强度和保持低且相对恒定的线膨胀系数。以接近(原子百分数)50-50%的镍和钛，形成一种形状记忆的金属间化合物合金，它们除了良好的塑性和耐腐蚀性以外，还通过一种热弹性的马氏体转变得到8%的可逆性应变。

$L1_2$ 金属间化合物 Ni_3Al 的开发研究，旨在形成一种能适合于高温用途的强且耐腐蚀的材料。锻压和铸造的铍-镍合金都是市场上可以提供的(例如作为Ni-2Be-0.5Ti的UNS N03360)，对于其加工和时效硬化热处理，都与铍-铜合金一样容易，并具有高强度(在冷轧和时效条件下的屈服强度高达1690MPa或245ksi)，以及较高的耐热软化和应力松弛的能力。

耐腐蚀性

合金元素的作用

铜。铜的加入能改善镍对于无氧化酸的耐腐蚀性。尤其是含有30%~40% Cu的合金，对于不分解硫酸(H_2SO_4)具有十分有用的耐腐蚀性，以及对于所有各种浓度不分解的氢氟酸(HF)都有极佳的耐腐蚀性。而且已经发现在镍-铬-钼-铁合金中，加入2%~3% Cu能提高其对盐酸(HCl)、H_2SO_4和磷酸(H_3PO_4)的耐腐蚀性。

铬。铬的加入有助于提高镍对氧化性介质如硝酸(HNO_3)和铬酸(H_2CrO_4)的耐腐蚀性。它还提高了对热H_3PO_4的耐腐蚀性。铬还能改善耐高温氧化和抗含硫碱的侵蚀。虽然合金可以配制成高达50% Cr，但通常合金的添加范围为15%~30%。

铁。一般将其加入镍基合金是为了降低成本而非提高耐腐蚀性。然而，铁还是能使镍提高对浓度高于50% H_2SO_4的耐腐蚀性。铁还能提高碳在镍里的溶解度，用于提高在高温渗碳介质中的耐腐蚀性。

钼。镍中所含的钼可以有效地提高对无氧化性酸的耐腐蚀性。含量高达28% Mo(Hastelloy B系列合

金)的工业用合金就是为了用于 HCl、H_3PO_4 和 HF 的无氧化性溶液中，还有浓度低于60%的 H_2SO_4。钼还能显著提高镍基合金对点蚀和缝隙腐蚀的耐腐蚀性。此外，它也是在开发高温用途的金属材料时用于提高强度的重要合金元素。

钨。其作用类似于钼，也是为了提高对于无氧化性酸和局部腐蚀的耐腐蚀性。然而鉴于其原子质量，必须加入质量为钼的两倍的钨才能获得等同的原子效果。由于这种对于合金密度的负面影响，以及钨的较高成本和较低可获取性，一般优先考虑采用钼的加入。然而，在镍-铬基与13%~16% Mo 的组合中，加入3%~4%钨将能形成具有极佳耐局部腐蚀的合金。

硅。它一般仅为多数镍基合金脱氧工序而残留的或者为提高耐高温氧化腐蚀性而特意作为次要元素加入的。在一些含有相当含量的铁、钴、钼、钨或其他难溶元素的合金中，硅的含量必须严格控制，因为它能稳定碳化物和有害的金属间化合物相。另一方面，已经发现硅作为一种主要的合金元素的使用能大大提高镍对热、浓 H_2SO_4 的耐腐蚀性。生产含有9%~11%Si 的合金就是为了以铸件形式用于这类用途。

钴。像铁一样，它也是为了提高碳在镍基合金的溶解度，以此提高耐渗碳的能力。进而，硫化钴的熔点高于硫化镍的熔点，因此采用钴合金化也是为了增强在高温下耐硫化作用的能力。

在特定环境中的特点

大气腐蚀。镍和镍基合金具有非常好的耐大气腐蚀性。腐蚀的速率一般 <0.0025mm/a(0.1mil/a)，并根据合金具有不同的变色程度(表3.8-5)。镍200将变得暗淡无光并形成一层粘着的腐蚀薄膜，通常为硫酸盐。在工业化的含硫大气中比在乡村或海洋性大气中形成更为严重的锈蚀。

表3.8-5　镍和镍基合金的耐大气腐蚀性

合　金	平均失重 /(mg/dm^2)	平均腐蚀速率①	
		mm/a	mil/a
镍200	468.6	<0.0025	<0.1
合金800	27.9	<0.0025	<0.1
合金600	19.7	<0.0025	<0.1
合金400	644.7	<0.0025	<0.1
合金825	8.7	<0.0025	<0.1

注：表中结果系在北卡罗来纳州 Kure 海滩离大洋24.4m 或80ft 的地方暴露12年所得。

①镍200和合金600无点蚀的记录。其他三种合金的四个最深点蚀的平均深度 <0.025mm(0.001in)。

合金400在所有各种大气中的腐蚀都可以忽略不计，尽管会有一种灰绿色的氧化层生成；在含(低价)硫大气中会生成一种褐色的氧化物表层。由于其低腐蚀率和悦目的氧化物表层，合金400应用于建筑的用途上如屋面、排水沟和围墙，以及户外雕塑。

含有铬和铁的镍合金如合金600和800，也具有非常强的耐大气腐蚀性，但经长期的暴露后，特别是在工业大气中会产生一种轻微的暗淡色泽。镍-铬-钼材料如同合金825、625、G、C-276和C-22都会生成非常薄的、钝化氧化物保护膜，以此防止产生明显的变色。在大气中长久暴露后，还能保持一种镜面的光洁。

水中的腐蚀。镍和镍基合金在蒸馏水和淡水中一般都有非常好的耐腐蚀性。镍200(工业纯镍)在常温下的桶装蒸馏水和生活用热水中的一般腐蚀速率分别为 <0.0025mm/a(<0.1mil/a)和 <0.005mm/a(<0.2mil/a)。镍铜合金如400和R-405也有非常低的腐蚀率，故应用于淡水系统的一些阀座和其他管件。由于镍合金的成本关系，通常在纯水或淡水的用途中都规定使用不太昂贵的不锈钢及其他材料，除非需要提高对 SCC 或点蚀的耐腐蚀性。例如，合金600和690以其高耐 SCC 而能应用于在高纯水的核蒸汽发生器里。

在蒸汽热水系统。在冷凝器里，如果非冷凝组分(CO_2 和空气)以一定的比例存在蒸汽中，则镍200和合金400会发生相当大的腐蚀。通过供给水的脱气或非冷凝气的抽空将能防止这种侵蚀。合金600具有对于所有各种蒸汽、空气和 CO_2 的混合气体的耐腐蚀性，并且在高温下与蒸汽接触时特别有用。

含有铬和铁的镍200、合金400和镍基合金在流动的海水里非常耐腐蚀，但是在停滞的或流速非常缓慢的海水里，特别在有污秽有机物或其他有淤积存在的情况下，还是会发生点蚀和缝隙腐蚀。在中速或高速的海或微碱水中合金400常应用于泵和阀的装饰以及输送管线。它对于气蚀具有极佳的耐腐蚀性，并且其腐蚀率 <0.025mm/a(1mil/a)。铠装合金400还能为用钢铁构建的海上油气平台、桩基及其他结构提供经济的、适合海水溅拍区的保护。虽然合金400在停滞条件下会发生点蚀，但这种点蚀经过初期的快速侵蚀后很快趋于缓慢，并很少会超过1.3mm(50mil)的深度。经时效硬化的合金 K-500的耐腐蚀性类似于合金400，常在淡水和海水中应用于高强度紧固件、泵和驱动轴。

含有铬和钼的其他镍基合金，能提高它们在静止海水中耐局部性腐蚀的能力。表3.8-6列出一些镍基合金和316类型的不锈钢在常温海水中耐腐蚀性的比较。在热海水的用途如换热器中，要求使用高合金材

料如合金625或C-276。此外，合金625、400和K-500常为美国海军规定用于与海水接触的湿润器件。

表3.8-6　不同合金对静止海水的耐腐蚀性

合　金	最大点蚀深度	
	mm	mil
625	无	无
825	0.025	0.98
K500	0.864	34
400	1.067	42
AISI 型号316	1.575	62

注：三年的暴露试验。

硫酸中的腐蚀。工业纯镍对于不分解的硫酸有充足的耐腐蚀性，只有其使用受到诸如有杂质的存在、暴露于变化的环境中或同时暴露在氢氧化物环境中（在某些换热器的应用遇到的情况）的一些其他工况条件的制约时，才对它进行选择。

合金400广泛应用于硫酸在还原的工况条件下的储运。在室温、无空气并浓度高达85%的酸中，其腐蚀速率低于0.25mm/a(10mil/a)。通过沸腾硫酸中的试验，在酸浓度为5%时，会形成0.086mm/a(3.4mil/a)的腐蚀速率，相应的酸浓度为10%，则腐蚀速率为0.061mm/a(2.4mil/a)，浓度为19%则腐蚀速率为0.19mm/a（7.5mil/a）。当在温度95℃(203℉)并不分解的浓度高达60%的酸中时，其腐蚀速率<0.51mm/a(20mil/a)。

合金B和D对于硫酸具有特别的耐腐蚀性，表3.8-7列出不同浓度酸的试验结果。

表3.8-7　硫酸中的腐蚀速率

酸浓度(%)	腐蚀速率			
	Hastellov B		Hastelloy D	
	mm/a	mil/a	mm/a	mil/a
在66℃(150℉)试验				
2	0.13	5	0.15	6
5	0.10	5	0.13	5
10	0.08	3	0.13	5
25	0.03	1	0.05	2
50	0.03	1	0.03	1
60	0.03	1	0.15	6
77	—	—	0.05	2
80	—	—	0.05	2
85	—	—	0.05	2
90	—	—	0.05	2
96	—	—	0.03	1

酸浓度(%)	腐蚀速率			
	Hastellov B		Hastelloy D	
	mm/a	mil/a	mm/a	mil/a
沸腾酸溶液试验				
2	0.03	1	0.10	4
5	0.03	1	0.18	7
10	0.05	2	0.33	13
25	0.05	2	0.23	9
50	0.05	2	0.28	11
60	0.18	7	0.20	8
80	—	—	0.91	36
85	—	—	2.31	91
90	—	—	4.85	191
96	—	—	2.18	86

合金600和800用于室温里的低浓度硫酸。虽然它们很少用于在任何其他工况条件下的硫酸用途，但是合金800已用于120℃(250℉)的99%酸的场合。

合金C-276和625都表现出良好的耐硫酸腐蚀性，然而它们二者可能都不能仅仅依此进行选用。

20Cb-3、合金G和合金825具有极佳的耐硫酸腐蚀性。虽然这些合金间的成分差别会造成某种腐蚀特性上的不同，然而当溶液的温度低于50℃(120℉)时，这些合金不论酸的浓度如何，其腐蚀速率在正常情况下都<0.13mm/a(5mil/a)。当酸浓度为60%~80%时，所有这三种合金根据其成分都会产生最大的腐蚀。

盐酸中的腐蚀。镍200、镍201、合金400和合金K-500在室温、无空气并浓度高至10%的盐酸里时，腐蚀速率均低于0.25mm/a(10mil/a)。在氯化物或氯化溶剂的水解过程中，所产生的盐酸浓度通常<0.5%，镍200和合金400在这种介质里，能承受的温度高达约~205℃(120℉)。在空气饱和的溶液里，腐蚀速率会急剧增加。在沸腾酸里，合金400在0.5%的浓度中以0.74mm/a(29mil/a)的速率腐蚀，

在1%的浓度中，以1.07mm/a(42mil/a)的速率腐蚀和在5%的浓度中以1.12mm/a(44mil/a)的速率腐蚀。而镍200的腐蚀速率更要高得多。

合金B对盐酸有突出的耐腐蚀性，而合金D有中等的耐腐蚀性。合金B在66℃(150℉)和1%、2%、5% HCl里以0.23mm/a(9mil/a)的速率腐蚀。当酸浓度增加到37%时，其腐蚀的速率降到0.05mm/a(2mil/a)。在沸腾的HCl中，1%浓度的腐蚀速率为0.05mm/a(2mil/a)，2%浓度的腐蚀速率为0.08mm/a(3mil/a)，5%浓度的腐蚀速率为0.18mm/a(7mil/a)，10%浓度的腐蚀速率为0.23mm/a(9mil/a)，15%浓度的腐蚀速率为0.36mm/a(14mil/a)和24%浓度的腐蚀速率为0.61mm/a(24mil/a)。因为铬会遭受盐酸的快速侵蚀，所以，合金600和800对这种酸几乎没有耐腐蚀性。由于其高含钼量，C-276和625两种合金在室温里对所有各种浓度的盐酸均有耐腐蚀性。当温度为66℃(150℉)且酸的浓度为5%~37%时，合金C-276将以0.51~1.3mm/a(20~50mil/a)的速率腐蚀。当试验温度为66℃(150℉)且酸浓度为37%时，合金625将发生速率为0.38mm/a(15mil/a)的腐蚀。

虽然正常情况下并不考虑将20Cb-3、合金G和合金825作为应用于盐酸中的材料，但是在酸浓度高达15%的室温下还是有用的。合金G在室温且浓度为10%的酸中试验，会以0.25mm/a(10mil/a)的速率腐蚀，而当浓度为5%时，Incoloy825发生的腐蚀速率为0.12mm/a(4.9mil/a)，当浓度为10%时，其速率为0.18mm/a(7.2mil/a)；当浓度为15%时，其速率为0.19mm/a(7.3mil/a)。

磷酸中的腐蚀。无论工业纯镍还是镍-铜合金都不能广泛应用于有热、浓磷酸的用途里。在低温或低浓度酸中，这些材料都有微量的腐蚀。例如合金400在95℃(200℉)以下的所有浓度的酸里试验，其腐蚀速率都在0.25mm/a(10mil/a)以下。

甚至在沸腾的10%~85%的磷酸中，合金B和D也表现为低腐蚀速率。合金600和800在室温下对所有各种纯磷酸都有耐腐蚀性。但是腐蚀速率随温度的升高而快速提高。

在磷酸的湿法制造过程中会有如氯化物、氟化物和SiO_2的几种杂质存在。由于这些杂质会增加对点蚀和缝隙腐蚀的敏感性，故对于一般性腐蚀的耐腐蚀性并不如对局部性侵蚀的耐腐蚀性那么重要。已经证明C-276和625在处置湿酸的蒸发器上是有用的。

硝酸中的腐蚀。所有不含有铬的镍合金对硝酸的耐腐蚀性都是很差的。含铬的镍合金对其有良好的耐腐蚀性，其腐蚀的速率基本上随含铬的增加而减小。由于沸腾的、浓度65%硝酸常用于测试合金的耐晶间腐蚀性(Huey试验,晶间腐蚀试验)，所以应当指出镍合金可以通过加入一些合金元素(如在20Cb-3、合金625和合金G中的铌以及在Incoloy 825中的钛)，获得碳化物析出的择优改进和晶间腐蚀的最小。

有机酸中的腐蚀。无论工业纯镍还是镍铜合金在单羧酸中的应用都是有限的。合金400在110℃(230℉)的冰乙酸中的腐蚀速率为0.33mm/a(13mil/a)。还有，充气一般会增加腐蚀速率。

合金B和D对大部分的有机酸都具有非常好的耐腐蚀性。在70℃(160℉)的温度下，无论是乙酸还是甲酸，其最大腐蚀速率都只有0.1mm/a(4mil/a)。

合金600和800对于热、长链有机酸有极佳的耐腐蚀性。用于硬脂酸、油酸、亚油酸和松香酸的油脂裂解塔一般都是采用合金600建造。合金C-276和625对于有机酸都有极佳的耐腐蚀性。通常认为甲酸是腐蚀性最强的单羧酸。合金C-276和625，在所有浓度的沸腾酸中的腐蚀速率均为0.025~0.05mm/a(1~2mil/a)。这些合金都是用于建造高温冰乙酸蒸馏塔的首选材料。

20Cb-3、合金G和合金825对有机酸都有很强的耐腐蚀性，适用于大部分与之有关的用途。

碱中的腐蚀。工业纯镍的耐碱腐蚀性在所有一般的工程材料中是最强的。但是氢氧化铵是一例外，它能与镍和铜生成络合物。镍200无法承受浓度高至1%无水氨或氢氧化铵的腐蚀。然而，较高浓度的氢氧化铵会造成快速侵蚀。

镍200和镍201在所有各种浓度和温度(甚至熔化)的氢氧化钠和氢氧化钾里，都有极佳的耐腐蚀性。镍200和镍201在浓度低于50%的氢氧化钠和氢氧化钾中的腐蚀速率都可以忽略不计(通常<0.005mm/a或0.2mil/a,甚至在沸腾的溶液中)。随着浓度和温度的提高，腐蚀的速率会缓慢的增加。虽然镍在熔化的无水苛性钠中发生的应力开裂已有所报道，但应力试件在长期的实验室和工厂里的暴露，却并未显示出对开裂的敏感性。氯酸盐或可氧化的硫化合物会增加苛性碱对镍的腐蚀影响。

镍铜合金对碱的耐腐蚀作用不如纯镍。然而在浓度至50%的沸腾碱中，镍铜合金的腐蚀速率仍低于0.025mm/a(1mil/a)，于是这些较为不昂贵的材料广泛地应用于此类用途。

合金B、C-276、D和G在碱性环境里有极好的耐腐蚀性，但是它们很少被应用，除非还含有其他的腐蚀剂。还有，20Cb-3和合金825具有在碱性环境中的

极佳耐腐蚀性，然而，它们也很少在这类介质中应用。

在涉及高温苛性碱的某些有硫存在或要求高强度的用途里，合金 600 可代替镍 201 使用。合金 600 中铬的含量对于硫的脆化具有较强的耐腐蚀性。合金 600 如同所有的镍合金一样，但工业纯镍除外，当与高温、高强度的苛性碱相接触时，能承受 SCC。于是，设备在使用前要进行充分的应力消除，并且将工作应力降到最低限度。

盐中的腐蚀。除了卤化物以外，盐的腐蚀性主要有赖于其氧化的强度以及它能水解成为酸还是碱。例如，耐硝酸腐蚀的材料多半能耐硝酸盐的腐蚀，包括硝酸钠和硝酸铁。这些硝酸盐具有高的氧化强度并易于水解形成硝酸。

卤化盐特别氯化物容易促成局部化侵蚀，如点蚀、缝隙腐蚀和 SCC。就一般而言，高含钼量有助于控制点蚀、缝隙腐蚀，而高含镍量有利于耐氯化物离子 SCC。

镍 200 和合金 400 无法承受任何一种氯化物盐的 SCC。它们对于所有非氧化性卤化物都有极佳的耐腐蚀性。氧化性的酸性氯化物，如氯化铁和氯化铜对于这些合金极具腐蚀性。次氯酸盐会造成点蚀。一般由氯氧化磷、三氯化磷、氯化亚硝酰、氯化苄和氯化苯酰构成的非常有活性和腐蚀性的混合物盐类都储存于镍 200 制造的设备内。

镍 200 和合金 400 对于中性和碱性盐类溶液如碳酸盐、硫酸盐、硝酸盐和乙酸盐具有良好的耐腐蚀性。甚至在严酷的浓度、温度、搅动和充气条件下，其腐蚀速率通常都小于 0.1mm/a(5mil/a)。镍 200 管材成功地应用于氯化钠和硫酸钠的蒸发器里，而包镍-镉钢用于建造旋转盐干燥箱。合金 400 广泛应用于盐厂里的蒸发器、结晶器、过滤器、管道以及类似的设备里。在酸性盐的溶液如氯化锌、硫酸铵和氯化铵里，镍 200 和合金 400 都有良好的耐腐蚀性，但合金 400 应用得更广泛一些。

合金 B 对无氧化性盐类具有极好的耐腐蚀性。氯化铜和氯化铁对于这种合金极具腐蚀性，而氯化铵、氯化铝和氯化锌要相对无损害。合金 B 对于硝酸盐、铬酸盐和其他氧化性盐几乎没有耐腐蚀性。这种镍-钼合金的典型用途与如在苯乙烯生产过程中的苯烷化作用中所使用的那种氯化铝型催化剂有关。它在强、沸腾氯化镁中的腐蚀率 <0.05mm/a(2mil/a)。这种合金还能在氯化物溶液中耐点蚀侵蚀。

合金 600 对于盐类的耐腐蚀性与镍 200 和合金 400 非常相似，然而合金 600 在氧化性酸性的盐中表现上乘。这种耐腐蚀性并不适用于氧化性酸性氯化物。合金 600 对于硝酸银有极佳的耐腐蚀性，故可应用于摄影技术中；及其对于强、热氯化镁的极佳耐腐蚀性。这种合金在温度高于 43℃（110 ℉）的氯化亚硝酰中优于镍 200。

合金 800 在强氯化物溶液中容易遭受点蚀。它还具有高耐 SCC 性，尽管不能完全免除其影响。在除了卤化物外的盐中，对于具有很大差异性的氧化性和非氧化性的两种介质，合金 800 都表现了极佳耐腐蚀性。

合金 625 和 C-276 对于所有各种盐类，包括氧化性氯化物都具有耐腐蚀性。20Cb-3、合金 G 和合金 825 的耐点蚀性都不如高钼合金，但是比合金 800 的耐腐蚀性要强得多。这三种合金对于除了氧化卤化物之外的所有各种盐类都具有极佳的耐腐蚀性。

氟、氯和氯化氢中的腐蚀。在室温里，氟能在镍、铜、镁和铁的表面形成氟化物保护膜，故可认为这些合金都能在低温氟中得到满意的应用。镍 201 和合金 400 适合于在高温氟中的应用。所有的含镍合金都耐干的氯和氯化氢的腐蚀，大部分甚至能耐其中等的高温。Monel 400 是在以氯化物为介质的气缸和阀的标准装饰材料。合金 C-276 能成功地处置湿氯。镍 201 和合金 600 是在高温的氯和氯化氢的用途中应用最为广泛的材料。

镍-铬钼合金如合金 C-276、625、Allcorr 和 C-22，都能在氧化性氯化物介质中表现出对点蚀的很高耐腐蚀性。表 3.8-8 所列是各种 Ni-Cr-Mo 合金在一种氧化性氯化物溶液中发生点蚀的临界温度。在含氯化物介质中，发生的点蚀腐蚀是最为常见的，尽管已知其他卤化物及有些硫化物也会引起点蚀。

表 3.8-8 镍合金在 6%$FeCl_3$ 中 24h 的评价中，发生点蚀时的临界温度

合金	临界点蚀温度	
	℃	℉
825	0.0, 0.0	32.0, 32.0
904L	2.5, 5.0	36.5, 41
种类 317LM 不锈钢	2.5, 2.5	36.5, 36.5
G	23.0, 25.0	73.5, 77
G-3	25.0, 25.0	77, 77
C-4	37.5, 37.5	99.5, 99.5
625	35.0, 40.0	95, 104
Allcorr	52.5, 52.5	126.5, 126.5
C-276	60.0, 65.0	140, 149
C-22	70.0, 70.0	158, 158

精选参考文献

- W. Betteridge, *Nickel and Its Alloys*, Ellis Horwood Ltd., 1984.
- J.R. Crum, Nickel (and Alloys), *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation*, R. Baboian, Ed., ASTM, 1995, p 476–480.
- W.Z. Friend, *Corrosion on Nickel and Nickel-Base Alloys*, John Wiley & Sons, 1980.
- G.Y. Lai, *High-Temperature Corrosion of Engineering Alloys*, ASM International 1990.
- N. Sridhar and G. Cragnolino, Stress-Corrosion Cracking of Nickel-Base Alloys, *Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation*, R.H. Jones, Ed., ASM International, 1992, p 131–179.

第9章 钴和钴合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，446~454页，其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

钴是一种韧性的银灰色磁性金属，它在外观和某些性能方面类似于铁和镍。例如原子序数为27的钴在周期表里直接处于铁和镍之间，钴的密度为 8.8g/cm^3，与镍相似（8.9g/cm^3）。其线膨胀系数也介于铁和镍之间。钴像铁一样也存在同素异构体。在低于417℃（783℉）的温度下，钴呈现为六方密排（hcp）的结构。在417℃（783℉）与其熔点1493℃（2719℉）之间，钴具有面心立方（fcc）的结构。

钴在利用其磁性、防腐蚀性、耐磨性和/或在高温下的强度方面得到应用。有一些钴基合金还具有生物相容性，由此促成其作为人体金属植入器官的应用。

采矿和冶炼

如今许多钴都是从非洲赞比亚和扎伊尔的富铜和铜-镍的硫化物矿藏中获得的。其他主要开采和冶炼钴的国家有挪威、加拿大、俄罗斯和芬兰。

最大的矿藏都采用露天和地下的方法进行开采。矿石在进行磁力富集工序之前，要经过粉碎、研磨和浮选的处理。然后将富集后的精矿在硫酸中进行浸滤，再利用电解法萃取钴和铜。

未来钴的其他资源还包括在太平洋底部发现的富锰结核矿。

钴的应用

钴的最大应用在于超合金，这种合金用于制造燃气轮机飞机发动机上的零件。钴还能用于制造磁体、耐腐蚀和耐磨损合金、高速钢、烧结的碳化物和金刚石工具、石化工业中所用的催化剂，用于油漆、清漆和墨水的干燥剂，用于搪瓷的底层涂料、颜料、电池电极、钢丝带束子午线轮胎以及磁性记录媒体。表3.9-1列出了在美国钴的终端应用的分布。如同表中数据所示，美国全部钴消耗中约46%用于超合金。然而在世界范围里，超合金的钴消耗约构成其总消耗的26%。一种增长最快的终端应用领域就是用于手提电子装置如手机、便携式摄像机、笔记本电脑等的 $LiCoO_2$ 充电电池。1996年，超过1200t的钴（5%的总用量）应用于电池。这个消耗量随电动车辆的发展还会增加，而这是对镍镉电池系统造成环境污染的忧虑而引起的。

表3.9-1 美国钴的终端应用消耗

应 用	t①②	
	1995	1996
钢		
工具钢	146	95
其他	38	38
超合金	2940	3230
合金（钢和超合金除外）		
磁性合金	757	728
焊接材料③	287	284
其他合金④	75	65
烧结碳化物⑤	748	722
化学物质和陶瓷		
催化剂	732	652
油漆干燥剂或有关用途	770	733
珐琅底釉	196	159
颜料	172	191
其他⑥	164	119
合计	7030	7010

①数据均圆整到三位有效数字，圆整值可不计入合计中。 ②含估计的数。 ③结构和硬面材料，含耐磨合金。 ④含非铁合金。 ⑤包括金刚石刀头的基体以及用于金属切削和加工的用途的。 ⑥包括食物或营养品添加剂、玻璃脱色剂、电池、阳极化以及用粉末冶金制造的轧制品。

引自地质调查——矿产信息，美国，1990。

钴基合金。钴基合金作为一个类别，一般都被表述为具有耐磨损、耐腐蚀和耐热（即在高温下保持强度）的特性。钴基合金的惟一最大的应用是在耐磨损的零件/用途上。在耐热用途方面，钴作为

镍基合金的一种合金元素获得更为广泛的应用，其使用的钴总量超过在钴基耐热合金中的使用数量。

这种合金的许多性能均源自于钴的晶体学特性（特别是它对应力的响应），铬、钨和钼的固溶体强化效应，金属碳化物的形成，以及由铬所赋予的耐腐蚀性。一般来说，较软和较韧的制品应用于如汽轮机的叶轮和叶片的一些高温用途里。而较硬的牌号则用于需要耐磨损的用途。

超合金中的钴。在镍基超合金中，钴[目前典型范围(质量分数)为10%~15%]起到固溶强化的作用并减小铝和钛的溶解度，故增加γ'析出物的体积分数(volume fracture,原文如此,应为 volume fraction之误——译者注)。在镍基超合金中的钴还可减少晶界碳化物析出的倾向，由此减少铬在晶界上的贫化。

钴也是某些铁基超合金的重要合金元素。例如Haynes 556(UNS R30556)是一种广泛应用于含硫环境中的Fe-Ni-Cr-Co合金。这种合金的耐硫化作用是由于其相对较低的镍含量(质量分数为20%)，并同时加入钴(质量分数为18%)及高铬含量(质量分数为22%)所致。

有关含钴的高性能合金的详细内容可参阅本手册第2篇第8章。

在烧结碳化物中的钴。钴在烧结碳化物中的作用就是为碳化钨颗粒提供一种塑性粘结基体。钴之所以能作为一种粘结基体与碳化钨一起使用是因为其在液相烧结的过程中具有湿润和毛细管作用，用以达到高密度。工业常见的烧结碳化钨含有范围(质量分数)为3%~25% Co。含(质量分数)3%~12% Co的烧结碳化钨(即硬质合金——译者注)作为一种切削刀具的材料得到了普遍的应用(更详细的可参阅本篇第13章)。

磁性材料中的钴。钴具有天然的铁磁性，能在多类磁性材料中提供退磁作用。钴与铁制成合金(49Co-49Fe-2V 和 Fe-27Co-0.6Cr)成为软磁材料。铁钴合金具有很高的正磁致伸缩系数，使其在传感器(声纳)和特别精密的定位装置中使用。

钴在永磁铁里能提高其居里(Curie)温度和饱和磁性。利用钴的永磁材料包括含(质量分数)17%~36% Co的钢、含(质量分数)5%~35% Co的Fe-Ni-Al合金(Alnico合金)、含(质量分数)约23% Co的铂-钴合金以及由钴和稀土金属如钐($SmCo_5$ 和 Sm_2Co_{17})构成的粉末冶金(P/M)材料。

有关软磁和永磁材料的更详细内容可参阅本篇第14章。

低膨胀合金中的钴。低膨胀或受控膨胀合金是指其尺寸不会随温度有明显改变的材料。含有钴的低膨胀合金包括含(质量分数)5% Co(Super- Invar)或17% Co(Kovar)的Fe-Ni-Co合金、含(质量分数)53%~54.5% Co(不锈钢 Invar)的Fe-Co-Cr合金和含(质量分数)13%~16% Co(例如 Incoloys 903、907 和 909)的高强度Fe-Ni-Co合金。本篇第14章对低膨胀合金有更加详细的叙述。

钢中的钴。在钢里，钴作为合金元素的最为突出的应用就是高速钢。钴能提高这种钢的热硬性，它应用于钼高速钢和钨高速钢。钴含量从约4.5%~13%。某些热作或冷作工具钢也含有钴(更详细的内容可参阅本手册第2篇第6章)。

某些超高强度钢如马氏体时效钢(质量分数为8%~9% Co)和高断裂韧性钢如AF1410(质量分数为14.1% Co)和AerMet100(质量分数为13.4% Co)中也含有钴。这些钢在本手册第2篇第3章中叙述。

耐磨损合金

现今所用的钴基耐磨合金从20世纪初由艾尔伍德·海尼斯(Elwood Haynes)开发钴-铬-钨和钴-铬-钼合金(Stellite合金)以来，并没有多大的变化。最重要的差别就是有关对碳和硅(在早期的合金中它是杂质)的控制。事实上，现代各种Stellite合金牌号间的主要差别在于碳和钨的含量(即在凝固过程中显微组织中碳化钨的数量和种类)。

表3.9-2所列是各种钴基耐磨损合金的常规成分。在特定用途中，见到的磨损种类(例如磨料磨损、滑动磨损和冲蚀磨损)是影响这些合金选择的重要因素。有关钴基合金在耐磨损用途中选择的更为详细内容，可参阅本章末所列的精选参考文献[1]~[10]。

Stellite合金。表3.9-2所列的Stellite合金一般以铸件或焊接涂覆层(硬面合金)的形式得到应用。然而，Stellite合金(一般含有≤1% B以增强其烧结)的P/M技术适合于一些对其有成本效率的用途上(即大批量的相对较小的零件)。如表3.9-2所示，Stellite合金遵循以下三元和四元合金体系：

- Co-Cr-W(合金1、4、6、12及190)；
- Co-Ni-Cr(合金27)；
- Co-Cr-Ni-W(合金F)；
- Co-Cr-Mo-Ni(合金21)；
- Co-Cr-Ni-Mo(合金31)；
- Co-Cr-Nb-Ni(合金306)。

表3.9-2 不同钴基合金的成分

合金商业名称	常规成分(质量分数,%)										
	UNSNo.	Co	Cr	W	Mo	C	Fe	Ni	Si	Mn	其 他
Stellite 耐磨损合金											
Stellite 1	R30001	余量	30	13	0.5	2.5	3	1.5	1.3	0.5	—
Stellite 4	—	余量	30	14	1 最大	0.57	3 最大	3 最大	2 最大	1 最大	—
Stellite 6	R30006	余量	29	4.5	1.5 最大	1.2	3 最大	3 最大	1.5 最大	1 最大	—
Stellite 12	R30012	余量	30	8.3	—	1.4	3 最小	1.5	0.7	2.5	—
Stellite 21	R30021	余量	27	—	5.5	0.25	3 最大	2.75	1 最大	1 最大	0.007B 最大
Stellite 23	R30023	余量	24	5	—	0.4	1	2	0.6	0.3	—
Stellite 27	R30027	余量	25	—	5.5	0.4	1	32	0.6	0.3	—
Stellite 31	R30031	余量	25.5	7.5	—	0.5	2 最大	10.5	1 最大	1 最大	—
Stellite 190	—	余量	26	14.5	1 最大	3.3	3 最大	3 最大	2 最大	1 最大	—
Stellite 306	—	余量	25	2	—	0.4	—	5	—	—	6Nb
Stellite F	R30002	余量	25	12.3	1 最大	1.75	3 最大	22	2 最大	1 最大	—
Laves 相耐磨损合金											
T-400	R30400	余量	9	—	29	—	—	—	2.5	—	—
T-800	—	余量	18	—	29	—	—	—	3.5	—	—
锻压耐磨损合金											
6B	—	余量	30	4	1.5 最大	1	3 最大	2.5	0.7	1.4	—
6K	—	余量	30	4.5	1.5 最大	1.6	3 最大	3 最大	2 最大	2 最大	—
锻压耐热合金											
25(1605)	R30605	余量	20	15	—	0.1	3 最大	10	0.4 最大	1.5	—
188	R30188	余量	22	14	—	0.1	3 最大	22	0.35	1.25	0.03La
铸造耐热合金											
MAR-M509	—	余量	23.5	7	—	0.6	—	1.0	—	—	0.50Zr, 0.2Ti, 3.5Ta
FSX-414	—	余量	29	7.5	—	0.25	1.0	10	—	—	0.010B
耐腐蚀合金											
Ultimet(1233)	R31233	余量	26	2	5	0.06	3	9	0.3	0.8	0.08N
MP159	R30159	余量	19	—	7	—	9	25.5	—	—	3Ti, 0.6Nb, 0.2Al
MP35N	R30035	余量	20	—	10	—	—	35	—	—	—

下面将介绍其中四种使用较为频繁的合金。

Stellite 合金 1、6 和 12 都是由 Haynes 最早开发的 Co-Cr-W 合金的改型。这些合金以其碳和钨含量为特征，Stellite 合金 1 为最硬、最耐磨料磨损以及塑性最差的。在 Co-Cr-W 基 Stellite 中的碳化物一般为富铬 M_7C_3 型，虽然富钨 M_6C 碳化物通常在高钨合金

(如 Stellite 合金 1)中也存在。

Stellite 合金 21 不同于前三种合金，它是利用钼而不是钨来强化固溶体的。Stellite 合金 21 还含有相当少量的碳。凭借高钼的含量以及存在于固溶体中(而不是在 Cr_7C_3 中)大部分铬的事实，该合金比 Stellite 合金 1、6 和 12 更加耐腐蚀。

Laves 相合金。它们包括 Tribaloy 族的耐磨损材料。在表 3.9-2 中列出了两种钴基 Laves 型的合金成分(T-400 和 T-800)。在这些合金当中，将钼和硅以超过其溶解度的程度加入，旨在诱发硬的(和耐腐蚀的)Laves 相(一种金属间化合物)的析出。在这些合金中尽可能保持低的碳，以此抑制碳化物的形成。

因为在这些合金中的 Laves 金属间化合物相是相当充裕的，故它的存在制约所有的材料性能。于是基体成分在这些合金中所产生的影响，不如像在钴基碳化物型合金(Stellite)的情况里那么突出。Laves 相对于特别高的耐磨料磨损性具有特殊的效用，但是它严重地限制材料的塑性和冲击强度。事实上，在除了一些经过适当预热的最小零件以外的所有元器件上，要实现无裂纹的涂覆层都是很困难的。为此，这些合金作为热(等离子)喷涂镀层使用更为成功。

锻压合金。高碳合金如表 3.9-2 中所列的合金 6B 和合金 6K，基本上都属于上述的表面硬化(Stellite)合金中的锻压合金类。锻压工艺能改善化学均质性(具有腐蚀意义上的重要性)、明显提高其塑性和相当程度地改进了合金内部碳化物析出物的几何结构(显微组织内的块状碳化物能增强耐磨料磨损性)。就成分(表 3.9-2)而言，这种合金基本上是一种 Co-Cr-W-C 的四元体，其中所含的铬除(在合金凝固的过程中)发挥主要作为碳化物形成元素的作用以外，还能提高固溶体的强度和耐腐蚀性。钨还能进一步提高固溶体的强度。合金 6B 含有(质量分数)大约 12.5% 碳化物，以及比例为 9:1 的 M_7C_3 和 $M_{23}C_6$。合金 6K 显现的则是一种甚至更高的碳化物体积比例，其中更以 M_7C_3 作为其突出类型。

性能数据。表 3.9-3 所列是六种常用钴基耐磨损合金的物理和力学性能。对于 Stellite 合金和 Tribaloy 合金，其数据针对的是砂型铸件。值得注意的是这种合金的中等屈服强度和硬度、碳含量(在 Stellite 的情形里)与塑性之间的反比关系以及通过锻压工艺使合金 6B 得以提高的塑性。一般来说，耐磨损合金应用于中等腐蚀和/或高温的环境里。

表 3.9-3　钴基耐磨损合金的物理和力学性能

性　能	合　金					
	1	6	12	21	6B	T-800
硬度　HRC	55	40	48	32	37①	58
屈服强度/MPa(ksi)	—	541(78.5)	649(94.1)	494(71.6)	619(89.8)①	—
抗拉强度/MPa(ksi)	618(89.6)	896(130)	834(135.5)	694(100)	998(145)①	—
伸长率(%)	<1	1	<1	9	11	—
线膨胀系数/[μm/(m·℃)]						
20~100℃(68~212℉)	10.5	11.4	11.5	11.0	13.9②	—
20~500℃(68~930℉)	12.5	14.2	13.3	13.1	15.0②	12.6
20~1000℃(68~1830℉)	14.8	—	15.6	—	17.4②	15.1
热导率/[W/(m·K)]	—	—	—	—	14.8	14.3
比重	8.69	8.46	8.56	8.34	8.39	8.64
电阻率/(μΩ·m)	0.94	0.84	0.88	—	0.91	—
熔化范围/℃(℉)						
固相线	1255(2291)	1285(2345)	1280(2336)	1186(2167)	1265(2309)	1288(2350)
液相线	1290(2354)	1395(2543)	1315(2400)	1383(2521)	1354(2470)	1352(2465)

① 3.2mm(1/8in) 薄板。　②起始温度 0℃(32℉)。

在图3.9-1里示出了六种常见的耐磨损合金成分的磨料磨损数据，并以316L不锈钢和D2工具钢(60HRC)的数据作为对照。这些数据都是通过ASTM G65B(干砂/橡胶轮)试验得到的，并且除Haynes合金6B(其试件用厚度为13mm或1/2in的固溶退火板制备而成)以外，试件都是用双层钨极气体保护堆焊(GTA)制备而成的。图3.9-1表明在Stellite族内的合金的耐磨料磨损取决于其碳和钨的含量。随着铬钨Stellite合金中含碳量的增加，钨的含量也要增加。这导致碳化物含量提高，以致硬度也提高。锻压工艺对于合金6B的益处和Laves相在T-800中的效果，在图3.9-1中也可看得很明显。

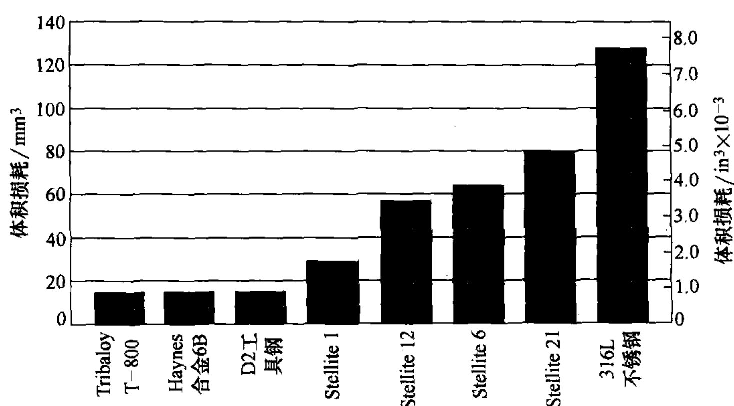


图3.9-1 不同钴基合金按ASTM G65B进行试验的磨料磨损数据

与Hastelloy合金C-276和316L不锈钢相比，钴基耐磨损合金具有突出的耐气蚀性能，如图3.9-2所示。其结果是通过ASTM G32的试验步骤获取的。其试件采用固溶退火板(用于Haynes合金6B、Hastelloy合金C-276和316L不锈钢)或双层GTA沉积(用于Stellite合金6和21)制备得到。

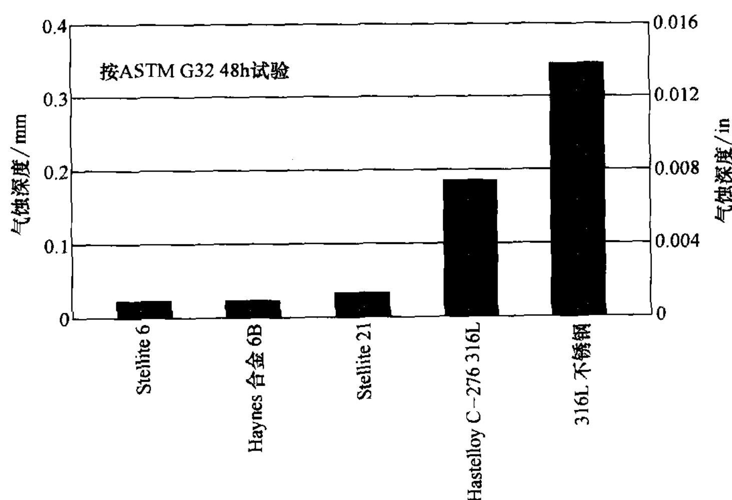


图3.9-2 不同钴基合金，Hastelloy合金C-276和316L不锈钢的气蚀数据

高温合金

钴基合金尽管不像镍和镍-铁超合金在高温中的使用那么广泛，但钴基高温合金还是能在其优异的抗硫化作用(见图3.9-3)及其在温度超过镍和镍-铁合金中的γ′和γ″析出物的溶解温度时所秉持的强度方面发挥重要作用。钴也能作为合金元素在许多钴基高温合金中得到应用。不同类型的铁、镍和钴基合金在高温中的应用，在本手册“超合金”一章中讨论。

应用于高温下的典型锻压和铸造钴合金成分如表3.9-2所示。锻压合金25和188的塑性、抗氧化性和显微组织稳定性都大大超过耐磨损锻压钴合金。这两种合金的含碳量(质量分数)都约为0.1%(约为合金6B的十分之一)，足以提供充分的碳化物强化，且也足够低，能使之保持塑性。主要作为M_6C型的

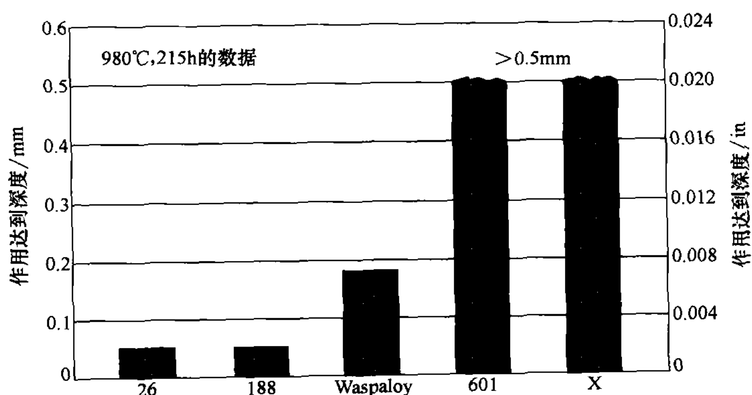


图3.9-3 钴基合金25和188相对于所选的镍基合金在980℃(1800℉)时的硫化作用数据

碳化物沉淀对于这种材料的高温性能是很重要的，部分是因为它能在热处理和使用过程中限制晶粒的生长。在这种合金里，镍能增强组织的稳定性，因在钴基合金中，镍降低 fcc/ hcp 的相变温度。

合金25(即所谓的L605)和188可以生产成为薄板、厚板、棒材、管道和管材(以及在很大范围里为连接而与之相匹配的焊接产品)的产品形式。这两种合金都已确立应用于汽轮机工业中的组装件和管网的制造。特别是合金188，为高性能的飞机燃气轮机选用于燃烧室外壳和后燃烧室的衬壁。合金25也已成功地应用于各种工业加热炉的用途(例如马弗和衬壁)。表3.9-4列出其有代表性的性能数据。

铸造钴基耐热合金，如表3.9-2所列的合金MAR-M509和FSX-414是被设计成钴-铬基体具有18%~30%的含铬量(质量分数)。正是由于这种高含铬量，促成其耐氧化性和耐硫化作用，还导致碳化物(Cr_7C_3 和 $M_{23}C_6$)形成的沉淀和固溶强化。碳的含量一般从0.25%~1.0%，偶尔可以氮替代碳。

表3.9-4 所选钴基高温合金的力学和物理性能

性质	合金		
	25	188	MAR-M 509
屈服强度/MPa(ksi)			
21℃(70℉)	445(64.5)①	464(67.3)②	585(85)③
540℃(1000℉)	—	305(44)④	400(58)③
抗拉强度/MPa(ksi)			
21℃(70℉)	970(141)①	945(137)②	780(113)③
540℃(1000℉)	800(116)⑤	740(107)④	570(83)③
1000小时断裂强度/MPa(ksi)			
870℃(1600℉)	75(11)	70(10)	140(20)
980℃(1800℉)	30(4)	30(4)	90(13)
伸长率(%)	62①	53②	3.5③
线膨胀系数/[μm/(m·K)]			
21~93℃(70~200℉)	12.3	11.9	—

性质	合金		
	25	188	MAR-M 509
线膨胀系数/[μm/(m·K)]			
21~540℃(70~1000℉)	14.4	14.8	—
21~1090℃(70~2000℉)	17.7	18.5	—
热导率/[W/(m·k)]			
20℃(68℉)	9.8⑥	10.8	—
500℃(930℉)	18.5⑦	19.9	—
900℃(1650℉)	26.5⑧	25.1	—
比重	9.13	8.98	8.86
电阻/(μΩ·m)	0.89	1.01	—
熔点范围/℃(℉)			
固相线	1329(2424)	1302(2375)	1290(2350)
液相线	1410(2570)	1330(2426)	1400(2550)

①薄板厚3.2mm(1/8in)。 ②薄板厚0.75~1.33mm(0.03~0.05in)。 ③铸造状态。 ④薄板，热处理1175℃(2150℉)1h，并快速空冷。 ⑤薄板，热处理1230℃(2250℉)1h，并快速空冷。 ⑥38℃(100℉)。 ⑦540℃(1000℉)。 ⑧815℃(1500℉)。

这些合金也含有相当的镍和钨。镍的加入有助于稳定所需要的fcc基体，而钨则能提高固溶强度和促进碳化物的形成。其他能促进固溶和/或碳化物形成的合金元素有钽、铌、锆、钒和钛。

熔模铸造的钴合金一般用于复杂的形状，如燃气轮机发动机上的喷嘴导流叶片。表3.9-4列出这些合金的有代表性的性质数据。

耐腐蚀合金

虽然钴基耐磨损合金具有一些耐水溶液腐蚀的能力，但是它们受到晶界上碳化物析出、在基体(在碳化物形成或Laves析出之后)中缺乏关键合金元素的限制，以及在铸造和表面硬化涂覆材料中由于显微组织的偏析所造成的影响。

锻压钴基高温合金(它们一般含有钨而不是钼)由于其均质的显微组织和较低的含碳量而有更强的耐水溶液腐蚀的能力，但还是达不到Ni-Cr-Mo合金的耐腐蚀性。

为了满足工业对于有极强耐水溶液腐蚀性合金的需求，并共享钴作为合金基体所具有的优势(能耐各种不同形式的磨损和具有在很大温度范围里的高强度)，已生产有多种低碳、锻压Co-Ni-Cr-Mo合金。在这些合金中加入钼(优先于钨)，能使其在不同湿性腐蚀介质里获得更大的

耐腐蚀性。此外，将这些合金的含碳量控制在固溶的范围之内，以此改进在焊接过程中对于热影响区的敏感性。

锻压耐腐蚀钴合金可以用于生产各种不同形式的产品(薄板、厚板、带材、圆棒/棒材和管材)。表3.9-5将Ultimet合金与镍基、铁基合金的耐腐蚀性进行了比较。含镍量较高的合金(MP159和MP35N)的耐应力腐蚀开裂的能力也比较高。表3.9-6列出这两种牌号有代表性的数据。这些合金常用于加工形变硬化或加工形变硬化并时效的工况里。

表3.9-5　所选钴基、铁基和镍基合金在各种溶液中腐蚀速率的比较

合　金	腐蚀速率/(mm/a)							
	沸腾99%乙酸	沸腾65%硝酸	沸腾1%盐酸	沸腾2%盐酸	54%P_2O_5，116℃(240℉)	沸腾10%硫酸	沸腾ASTM-G28A溶液	沸腾ASTM-G28B溶液
Ultimet	<0.01	0.15	0.01	13.49	0.19	2.52	0.20	0.02
C-276	<0.01	21.51	0.52	1.90	0.58	0.51	8.05	0.86
625	0.01	0.51	0.03	14.15	0.30	0.64	0.43	71.08
20Cb-3	0.11	0.19	1.80	5.77	0.92	0.40	0.25	69.08
316L	0.19	0.24	13.31	25.15	5.11	47.46	0.94	80.51

表3.9-6　所选钴基耐腐蚀合金的物理和力学性能

性　质	Ultimet①	MP35N	性　质	Ultimet①	MP35N
硬度	28HRC	90HRB②	线膨胀系数/[μm/(m·K)]		
屈服强度/MPa(ksi)	558(81)	380(55)	21~540℃(70~1000℉)	—	15.7③
抗拉强度/MPa(ksi)	1020(148)	890(130)②	热导率/[W/(m·K)]	—	11.2③
伸长率(%)	33	65②	电阻/(μΩ·m)	—	1.03③
线膨胀系数/[μm/(m·K)]			熔化范围/℃(℉)		
21~93℃(70~200℉)	—	12.8③	固相线	1333(2431)	1315(2400)
21~315℃(70~600℉)	—	14.8③	液相线	1355(2471)	1440(2625)

①13mm(1/2in)，厚板，固溶退火。　②冷拉棒材，固溶退火。　③加工形变硬化并时效。

特种用途合金

人工移植骨。钴基合金广泛应用于制造各种外科植入体内的装置。其应用包括臀骨移植、膝盖骨移植以及断裂骨骼的固定(骨螺钉、骨夹和骨板)。心脏阀瓣的支承结构也往往用钴合金制造。各种不同的牙种植体也是用钴合金生产的。

目前用于植入体内的大部分钴基合金都要符合ASTM F75、F799、F90和F562的要求。标准F75和F799分别规定了Co-Cr-Mo的铸造和热形变工艺要求，F90规定了锻压Co-Cr-W-Ni的要求，而F562规定锻压Co-Ni-Cr的要求。这些合金的成分如表3.9-7所示。人工移植骨所要关注的性能包括生物相容性、耐腐蚀性、耐磨损性以及像强度、塑性、高循环疲劳特性等力学性能。表3.9-8所示为钴基外科植入合金的性能对于其工艺过程具有高度的敏感性。

表3.9-7　钴基外科植入合金的成分

ASTM标准	化学成分(质量分数,%)								
	Co	Cr	Ni	Mo	Fe	C	Mn	Si	其　他
F75	余量	27.0~30.0	1.0	5.0~7.0	0.75	0.35	1.0	1.0	—
F90	余量	19.0~21.0	9.0~11.0	—	3max	0.05~0.15	1.0~2.0	0.4	14.0~16.0W
F562	余量	19.0~21.0	33.0~37.0	9.0~10.5	1max	0.025max	0.15max	0.15max	1.0Ti(max)

表3.9-8 钴基外科植入合金的力学性能

ASTM标准	合金体系	状态	屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)	弹性模量	
			MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi
F75	Co-Cr-Mo	铸造	450	65	655	95	8	248	36
F799	Co-Cr-Mo	热形变工艺	827	120	1172	170	12	—	—
F90	Co-Cr-W-Ni	锻压	379	55	896	130	—	242	35
F562	Co-Ni-Cr-Mo	退火	241~448	35~65	793~1000	115~145	50	228	33
		冷加工并时效	1586	230	1793	260	8	—	—

时效硬化合金。一些复杂的钴基合金能用类似于某些镍基合金的方式进行时效(析出)硬化到一定程度。Duratherm600(UNS R30600)就是一种这样的合金，其成分如下所示：

元素	化学成分(质量分数,%)	元素	化学成分(质量分数,%)	元素	化学成分(质量分数,%)
钴	41.0~42.0	钨	3.6~4.2	铜	0.3max
镍	余量	钛	1.8~2.2	铌	0.1max
铬	11.7~12.3	铝	0.6~0.8	铍	0.05max
铁	8.5~8.9	锰	0.4~1.1	碳	0.05max
钼	3.7~4.3	硅	0.2~0.6		

通过冷变形加工与热处理的组合，再时效硬化的钴合金的屈服强度和硬度能分别达到2000MPa(290ksi)和600HV以上。高强度结合极佳的耐腐蚀性和热稳定性，就是为什么这些合金能应用于：能承受极高载、高温的弹簧(如烘烤炉里的开关弹簧)、压力表里的膜片、板簧(尤其用于石化工业腐蚀介质中)以及用于磁头的非常薄的非磁性、耐磨损隔垫箔。其他时效硬化钴合金包括Havar(UNS R30004)和Arnavar(UNS R30007)。

参考文献

[1] K.J. Bhansali and A.E. Miller, Role of Stacking Fault Energy on the Galling and Wear Behavior of a Cobalt Base Alloy, *Wear of Materials,* American Society of Mechanical Engineers, 1981, p 179.

[2] K.C. Antony and W.L. Silence, The Effect of Composition and Microstructure on Cavitation Erosion Resistance, *Proc. 5th International Conf. Erosion by Solid and Liquid Impact,* Cambridge University Press, 1979, p 671.

[3] C.J. Heathcock, B.E. Protheroe, and A. Ball, The Influence of External Variables and Microstructure on the Cavitation Erosion of Materials, *Proc. 5th International Conf. Erosion by Solid and Liquid Impact,* Cambridge University Press, 1979, p 631.

[4] W.L. Silence, Effect of Structure on Wear Resistance of Co-, Fe-, and Ni-Base Alloys, *Wear of Materials,* American Society of Mechanical Engineers, 1977, p 77.

[5] R.B.H. Herchenroeder, S.J. Matthews, J.W. Tackett, and S.T. Wlodek, Haynes Alloy No. 188, *Cobalt,* Vol 54, 1972, p 3.

[6] H.M. Tawancy, V.K. Ishwar, and B.E. Lewis, On the FCC to HCP Transformation in a Cobalt-Base Superalloy (Haynes Alloy No. 25), *J. Mater. Sci. Lett.,* Vol 5, 1986, p 377.

[7] A. Ninham, The Effect of Mechanical Properties on Erosion, *Wear,* Vol 121, 1987, p 307.

[8] A.V. Levy and S. MacAdam, "Erosion-Corrosion of Materials in Coal-Water Slurries," Report AP-5628, Electric Power Research Institute, 1988.

[9] F.H. Stott, C.W. Stevenson, and G.C. Wood, Friction and Wear Properties of Stellite 31 at Temperatures from 293 to 1073K, *Met. Technol.,* Feb 1977, p 66.

[10] P. Crook and C.C. Li, The Elevated Temperature Metal-to-Metal Wear Behavior of Selected Hardfacing Alloys, *Wear of Materials,* American Society of Mechanical Engineers, 1983, p 272.

精选参考文献

- A.I. Asphahani et al., Corrosion of Cobalt Alloys, *Corrosion,* Vol 13, *ASM Handbook,* ASM International, 1987, p 658-668.
- P. Crook, Cobalt-Base Alloys, *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation,* R. Baboian, Ed., ASTM, 1995, p 486-492.
- P. Crook and A.V. Levy, Friction and Wear of Cobalt-Base Wrought Alloys, *Friction, Lubrication, and Wear Technology,* Vol 18, *ASM Handbook,* ASM International, 1992, p 766-771.
- P. Crook and H.N. Farmer, Friction and Wear of Hardfacing Alloys, *Friction, Lubrication, and Wear Technology,* Vol 18, *ASM Handbook,* ASM International, 1992, p 758-765.
- Metallurgy, Processing, and Properties of Superalloys, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials,* J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p 221-254.

第10章　锆　和　铪

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》第 2 卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，661 ~ 669 页；《ASM 手册》第 13 卷腐蚀，1987，707 ~ 721 页。其他有关内容可以查阅本章末所列的参考文献。

锆如同钛及其姊妹金属铪一样，都归类于活性金属（一种易于在高温中与氧结合生成非常稳定的氧化物的金属）。锆在许多化学和力学方面都与钛相似，但它具有较高的密度和熔点（6.51g/cm³ 和 1852℃ 或 3365℉，与之相比钛为 4.51g/cm³ 和 1668℃ 或 3034℉）。锆对于许多腐蚀介质都有极佳的耐腐蚀性，包括过热水，并且几乎能为热能中子所穿透。这些性能再结合其良好的力学性能，使锆在核能方面尤其作为铀燃料和其他反应器内部零件的涂覆层非常有用。

如今锆应用于水冷核反应堆的所占份额是很高的，第二大用途是在化学处理设备中。因为锆粉末会自燃（它会自动点火并在氧气或空气中燃烧），被应用于闪光灯、火焰喷射器和在密封装置如真空管里，作为收气剂用于吸收污染气体。

铪具有一种对于热能中子的高捕获横截面（即对于热中子是高度不透明的），与此对照的锆具有非常低的吸收横截面，故能应用于核反应堆的控制杆。过去铪主要是作为一种中子吸收材料使用，然而目前铪在超合金中的应用已经超过在反应堆中的应用。铪在超合金中是作为一种晶界强化剂发挥作用的（在定向性凝固的超合金中加入 1.5% ~ 2% Hf 可防止其晶界的开裂）。锆和铪都是其他的一些金属体系如铝、铜、镁、耐熔金属合金、钛合金以及超合金中的基本合金元素。

金属的冶炼与制造

冶炼。锆和铪是用一般从含有锆土、金红石和钛铁矿的粘性沙滩砂里选出的矿石进行生产的。锆土就是锆-铪硅酸盐（Zr-Hf, SiO_4），属于宝石中的一种，锆同铪之比为 50: 1。采用标准的矿石选矿法将锆土从金红石、钛铁矿和其他矿藏中分离出来。

利用 Kroll 锆化合物还原法对锆和铪进行提纯，其工艺是 1947 年由美国矿产局 W. J. Kroll 开创的。冶炼的过程是将锆土与焦炭形式的碳混合，然后将混料氯化产生出除了四氯化锆和铪以外还有含四氯化硅的气流。然后四氯化锆-铪被进行选择性的凝聚，而四氯化硅经收集作为副产品出售。

为了生产工业牌号的锆，粗制四氯化锆-铪可以用镁进行提纯和还原成为金属。用于核用途的锆必须与铪分离。这可以采用液-液分离工艺或蒸馏工艺的处理方法完成。得到的结果为疏松状的海绵金属，它们可视情况进行进一步的冶炼。通过真空电弧熔化锆海绵和从冶炼中回收的材料以及合金化元素形成锆锭。铪锭通常是从晶棒、海绵金属和废料的混料中熔炼得到的。

粗加工。锻压锆合金和铪能用最为便利的技术进行加工，包括锻造、热轧和冷轧、管材的热挤以及圆棒和线材的热模锻和冷拉。用于阀、泵和其他零件的锆可以使用以撞实和机加工两种方法制成的石墨铸型，或者用熔模技术制成的壳型模进行铸造。其金属采用真空电弧熔渣或真空感应熔炼。

二次加工。锆和铪都易于用传统的方法进行切削加工。然而它们都有可能因此发生擦伤和加工硬化。这可以通过降低切削速度、加大进给和使用水溶性润滑油剂的冲淋润滑系统予以避免。锆和铪还可以在常用的磨床上进行磨削加工。

用于焊接锆和铪的最为普通的技术是钨电极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊。在焊接这些金属的时候用惰性气体进行适当的空气屏蔽是非常重要的。因为在焊接温度下，锆和铪对于大部分气体具有活性，没有适当屏蔽的焊接会导致从大气中吸入氧气、氢气和氮气，造成焊缝的脆化。

锆的金属学性质及其合金

锆及其大部分合金都表现出强烈的各向异性，这是由于其金属的两个特征：锆在室温里具有六方密排（hcp）的晶体结构，在约 870℃（1600℉）的温度下发生同素异构转变而成为体心立方（bcc）。这种强烈的同素异构性会深刻地影响锆及其合金的工程性能，故当选用并加工锆金属时，必须予以考量。其最常见的合金就是其特征一般类似于非合金化锆的相当稀释的

α合金。

同素异构转变

在锆中，低温α相具有hcp晶体结构。这种相在约870℃(1600℉)的温度下转变成为bcc结构。少量的杂质特别是氧，会强烈地影响其相变温度(表3.10-1)。

表3.10-1 非合金化锆的同素异构转变温度随含氧量的不同而变化

温度		含氧量分别为1640、1370和970ppm时的相		
℃	℉	1640ppm	1370ppm	970ppm
955	1750	β	β	β
930	1710	α+β	β	β
925	1700	α+β	β	β
920	1690	α+β	β	β
915	1680	α	α+β	β
910	1670	α	α+β	β
905	1660	α	α+β	β
895	1640	α	α+β	α+β
890	1630	α	α	α+β
885	1625	α	α	α+β
865	1590	α	α	α
855	1575	α	α	α

通过在冷却过程中的转变会逐渐形成一种α锆的魏氏(Widmanstätten)结构，即使通过快速淬火也无法保持β相。冷却的速度越快，小片状的魏氏结构就越细。锆的相稳定性受到α-和β-的稳定化元素和低溶解度的金属间化合物形成元素的影响。

α稳定化元素。用于提高同素异构的从α相至β相的相变温度。这些元素包括铝、锑、锡、铍、铅、铪、氮、氧和镉。上述各种元素与锆之间的二元合金体系的相图都在其富锆端出现包晶或包析反应。

β稳定化元素。用于降低同素异构的从α相至β相的相变温度。典型的β稳定剂包括铁、铬、镍、钼、铜、铌、钽、钒、钍、铀、钨、钛、锰、钴和银。对于锆与这些元素之间的二元合金体系，在相图的富锆端通常存在着共析反应，通常也为共晶反应。

低溶解度的金属间化合物形成元素。金属间化合物形成元素如碳、硅和磷在锆中有非常低的溶解度，即使温度高于1000℃(1830℉)。它们也容易形成相对稳定的、对热处理相对不敏感的金属间化合物。

如铁和铬的一些杂质容易溶解于β锆中，但相对不溶解α锆中的，此时它们主要作为金属间化合物而存在。这些二次相的大小和分布很大地受制于在从β到α的最后转变期间所发生的反应，以及随后在较低温度的机械加工。

在接近α-β相变温度或在α+β区的温度加热，会造成许多杂质在晶界上的迁移。这种迁移将削弱塑性和耐腐蚀性，尤其在锆合金里。然而，它在某些非合金化的锆里是有益的。

冷变形加工和再结晶

非合金化锆能够进行冷变形加工的程度取决于金属纯度和压缩的方法。锆能快速变形加工硬化，在冷压缩量约有20%后就可达到最大硬度和强度。然而在冷轧中约50%的压缩量是很普通的，在某些情况里还能达到80%。由于起始于非常软的金属和采用以多轴加载为特点的设备(例如皮尔格冷压机(Pilger Machine)或森氏极薄钢板多辊轧机(Sedzimir rolling mills))甚至可以获得90%或以上的压缩量。在冷拉过程中的压缩量一般约为15%~30%。一开始，变形会造成孪晶，由它使晶格相对于滑移重新取向，而滑移则是冷加工的主要机制。

再结晶取决于冷变形加工的程度、温度和时间，且时间起作用相对较小。在经受重度冷变形加工的材料中，再结晶开始于约510℃(950℉)，这种材料的工艺退火通常在620~790℃(1150~1450℉)温度下进行。再结晶发生的时间短到15min，但长得多的时间通常用于确保全部的炉料都达到温度。在常用的退火温度下，晶粒的生长几乎不存在；要求经过100h甚至更长的时间使晶粒长大达ASTM 2~3。

经过约5%~8%的压缩后的退火能使大晶粒生长。最常见的大晶粒源于在仅以少量冷作加工的校直或成形工序之后的再次退火。

同素异构和择优取向

锆晶体结构的择优取向和形成这种取向的加工工艺之间的关系，以及由此形成的性能是很复杂的且经过深入的研究。对于大多数的工程应用，了解锆的锻压方式及其沿合金轧制方向(或纵向方向)相对其横向方向会有不同的拉伸特性，是很重要的。沿横向方向有较高的屈服强度，而沿轧制方向的抗拉强度就稍微高一些。

氧的作用

氧一直以为是锆的一种会引起麻烦的杂质，为消

除这种影响已尽了很大的努力。但是当氧的含量最终降低到1000ppm以下时，将发现作为核级牌号的锆合金所要求的强度再也无法满足。于是氧的状态则成为一种固溶合金化控制剂。早期测定氧含量的方法既原始又不精确，故硬度（它与含量也只有粗略的关系，但测定较为容易）就成为其控制特征，并至今仍广泛用于表征非合金化锆和锆合金的纯度或牌号。

Kroll法的海绵锆中氧含量的变化范围为500～2000ppm，取决于提纯步骤的数量和其每一步的有效性。硬度125HB表示一种氧含量为800ppm的软海绵，而165HB就能认为是硬的，且氧含量为1600ppm。晶棒锆的一般硬度低于100HB且氧含量低于100ppm。

氧是室温里的有效强化剂，但在高温下就会丧失其大部分有效性。

合金的牌号

锆矿一般含有约1.5%～4% Hf。虽然铪具有与锆相似的化学和金属学性质，但其核特性明显不同。铪是一种中子吸收剂，但锆却不是。故而锆有核级牌号的和非核级牌号的。其核级牌号基本上是无铪的，而非核级牌号可以含有高达4.5% Hf。严格地说，名称为（Zircaloy）的锆合金和Zr-2.5Nb都适用于核级牌号的材料。

最普通的锆合金即Zircaloy-2和Zircaloy-4含有强α稳定剂锡和氧，再加上β稳定剂，铁、铬和镍。故存在着一个温度从790～1010℃（从1450～1850℉）的α+β的展宽区域。铁、铬和镍形成金属间化合物，这些化合物相的分布对于其在蒸汽和热水中的耐腐蚀性是至关重要的。这些合金一般在β区里进行锻造，然后在约1065℃（1950℉）进行固溶处理和水淬。随后在α区（低于790℃或1450℉）里进行热变形加工和热处理，以此保持在固溶处理和淬火中生成的金属间化合物的细致和均匀的分布。

锆合金除比其非合金化牌号的强度更高一些和塑性更低一些以外，Zircaloys在金属学的特性方面都与非合金化锆十分相似。

另外惟一具有商业重要性的锆合金就是Zr-2.5Nb。在锆里，铌是一种缓和的β稳定剂，但w(Nb)超过1%时就会引发共析反应（共析点发生在20% Nb）。Zr-2.5Nb的物理和力学性能与Zircaloys非常相似，然而其耐腐蚀性比Zircaloys稍差一些。

核级牌号。下面将讨论四种可共选用的反应堆牌号的锆和锆合金。

反应堆牌号锆（UNS R60001）一种高度提纯的非合金化锆，目前作为锆合金燃料包覆管的内衬使用。它的耐蒸汽和热水腐蚀性的变化很大。

Zircaloy-2（UNS R60802）是一种锆锡合金，并含有少量的铁、铬和镍，因此具有高度的耐蒸汽和热水腐蚀性，广泛应用于核反应堆的用途。

Zircaloy-4（UNS R60804）是一种Zircaloy-2的变型，但它不含有镍而含有较高并严格控制的铁含量。这种合金也应用于核用途上，当其处于水和蒸汽的腐蚀中时，比锆合金-2吸收较少的氢。

Zr-2.5Nb（UNS R60901）对过热水有很高的耐腐蚀性，它的可热处理性使之具有的强度比Zircaloys所能达到的强度更高。它的开发是为了用于重水反应堆的压力管，例如加拿大的氘铀（CANDU）反应堆。

表3.10-2概括了核合金的成分和力学性能。有关锆的核应用的ASTM技术标准，包括B351（棒材、圆棒和线材）、B352（薄板、带材和厚板）以及B353（无缝管和焊接管）和B811（用于核反应堆燃料包覆的无缝管）。

表3.10-2　核级牌号锆的常规成分和力学性能

代号		常规成分（质量分数，%）						最小抗拉强度		最小0.2%条件屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
牌号	UNS编号	Sn	Fe	Cr	Ni	Nb	O①	MPa	ksi	MPa	ksi	
非合金化反应堆牌号	R60001	—	—	—	—	—	0.8	290	42	138	20	25
Zircaloy-2	R60802	1.4	0.1	0.1	0.05	—	0.12	413	60	241	35	20
Zircaloy-4	R60804	1.4	0.2	0.1	—	—	0.12	413	60	241	35	20
Zr-2.5Nb	R60901	—	—	—	—	2.6	0.14	448	65	310	45	20

①典型含量。

非核级牌号。也称其为工业合金，主要应用于化工设备（即泵、阀、管道和换热器），阐述如下。

牌号702(UNS R60702)：即工业用纯锆，类似于反应堆级锆。

牌号704(UNS R60704)：即Zr-1.5Sn合金，与Zircaloy-2和Zircaloy-4相似。

牌号705(UNS R60705)：即Zr-2.5Nb合金，是一种强度较高的合金，与核级牌号R60901相似。

牌号706(UNS R60706)：与牌号705的差别仅仅在有较低的氧含量、较低的抗拉和屈服强度以及较大的伸长率。

表3.10-3概括了非核合金的成分和力学性能。有关锆合金的非核应用的ASTM技术标准，包括B493(锻件)、B523(无缝和焊接管材)、B550(棒材和圆棒)、B551(平轧产品)、B658(管道)、B653(接头)和B752(铸件)。

表3.10-3 非核级牌号锆的常规成分和力学性能

代号		常规成分(质量分数)						最小抗拉强度		最小0.2%条件屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
牌号	UNSNo.	Zr+Hf(最小)	Hf(最大)	Fe+Cr	Sn	Nb	O	MPa	ksi	MPa	ksi	
702	R60702	99.2	4.5	0.2	—	—	0.16	379	55	207	30	16
704	R60704	97.5	4.5	0.3	1.5	—	0.18	413	60	341	35	14
705	R60705	95.5	4.5	0.2	—	2.5	0.18	552	80	379	55	16
706	R60706	95.5	4.5	0.2	—	2.5	0.16	510	74	345	50	20

耐腐蚀性

锆是一种活性金属，在25℃(75℉)温度下以其对于标准氢电极的氧化还原电势-1.53V足以为证。它与氧气有高度的亲和力。当锆暴露在一个含氧的环境里时，其表面会形成一层粘着的保护氧化膜。这层膜是在空气或水中和常温及其以下的温度下自发形成的。进而，这层膜还能在高达300℃(570℉)的温度下自我修复，并保护其基体金属不受化学和机械侵蚀。其结果是，锆在大部分的无机和有机酸、强碱、盐溶液和一些熔化盐中都是非常耐腐蚀的。锆不受氧化介质的侵蚀，除非有卤化物的存在。

锆能在化学工业中承担在热硫酸(H_2SO_4)中大部分的一般性应用。锆具有极佳的耐浓度高达50% H_2SO_4，且温度达到沸腾甚至更高时的腐蚀。浓度从50%~65%并在高温里的耐腐蚀性一般是极好的，但是钝态保护膜的阻隔有效性会变差。经验表明在浓度超过50% H_2SO_4中的氧化物质，会促成其有选择性的侵蚀。在浓度超过70% H_2SO_4里，锆的腐蚀速率会随浓度的增加而急剧提高。

应力腐蚀开裂(SCC)。锆及其合金能耐许多介质中的SCC，如氯化钠(NaCl)、盐酸(HCl)、氯化镁($MgCl_2$)、氢氧化钠(NaOH)和硫化氢(H_2S)，它们会使其他合金发生SCC。而锆在化学应用中，因为SCC而失效的情况几乎见不到。锆的高耐SCC性能是得益于其高速率的保护膜再形成。如果有氧的存在，其保护膜的任何损坏都将很快得到修补。甚至在脱水的系统里，保护膜的再形成一般也需要有充分的氧存在。

已知能造成锆的SCC的环境包括三氯化铁($FeCl_3$)或氯化铜($CuCl_2$)溶液，甲醇(CH_3OH)和盐酸(HCl)或者甲醇和碘的混合物，浓硝酸(HNO_3)，以及液态汞或铯。

铪

产品形式和性质。铪以经提纯的非合金化形式用于控制杆。铪产品含有大约250ppmO_2，以利于其加工塑性。其产品形式有厚板、薄板、箔材、圆棒和线材。ASTM技术标准B737适用于热轧和冷精轧圆棒和线材，而B776适用于铪和铪合金的平轧产品及相关的用途。表3.10-4列出铪产品的力学性能。

表3.10-4 完全退火的铪产品的典型力学性能

产品	试验温度[①] /℃(℉)	试验方向	抗拉强度		屈服强度		50mm(2in)长的伸长率(%)
			MPa	ksi	MPa	ksi	
圆棒和线材	RT	纵向	400	58	151	22	22
	315(600)	纵向	172	25	83	11	32
带材、薄板和厚板	RT	纵向	400	58	151	22	20
	RT	横向	310	45	172	25	25
	315(600)	纵向	172	25	83	11	25
	315(600)	横向	158	23	96	14	35

① RT，室温。

耐腐蚀性。与其他活性材料一样，由于在其金属表面自然形成的薄且坚韧的氧化层，铪能耐

许多化学物质的侵蚀。只要这个薄层不会在升高的温度中被反应物质穿透，其耐腐蚀的性质就不会受影响。

铪在水和蒸汽、熔化的碱金属以及低于400℃(750℉)的空气里的耐腐蚀性要优于锆和锆合金的。然而在较高的温度下，铪开始易于与氧、氮和氢发生反应。在约400℃(750℉)下，铪开始缓慢地与空气或氧气反应生成氧化铪；在约900℃(1650℉)下，与氮生成氮化物；而在约700℃(1290℉)下，与氢快速生成氢化物。在这种高温下所形成的氧化物和氮化物容易在表面保持，然而氢会在整个金属中迅速弥散并在整个金属上形成氢化物。氧化物、氮化物和氢化物都会导致塑性的减弱。

在水溶液中，铪能溶解于氟化氢(HF)和浓H_2SO_4中。它具有在稀HCl和H_2SO_4中的耐腐蚀性，并在所有各种浓度的HNO_3中都不受影响。王水能溶解铪，加入少量的可溶解氟化物盐会加速铪与其他酸的反应。铪在碱中也极具耐腐蚀性。

精选参考文献

- *The Development of the Zircaloys in Corrosion of Zirconium Alloys*, STP 368, ASTM, 1964.
- *Industrial Applications of Titanium and Zirconium*, STP 728, ASTM, 1981.
- *Industrial Applications of Titanium and Zirconium; Fourth Volume*, STP 917, ASTM, 1986.
- *Industrial Applications of Titanium and Zirconium; Third Conference*, STP 830, ASTM, 1984.
- B. Lustman and F. Kerze, Jr., Ed., *Metallurgy of Zirconium*, McGraw-Hill, 1955.
- *Manual on Zirconium and Hafnium*, STP 639, ASTM, 1977.
- T.-L. Yau, Stress-Corrosion Cracking of Zirconium Alloys, *Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation*, R.H. Jones, Ed., ASM International, 1992, p 299–311.

第 11 章　贵重金属及其合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》，第 2 卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，688～718 页，其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

贵重金属包括银、金和六种铂系金属——铂、钯、钌、铑、锇和铱——因它们在自然界共生在一起而得名。贵重金属也称为惰性金属，其用途遍及我们的日常生活。金、银和铂广泛用于制造珠宝，金、银和其他金属还用于牙科镶补，货币银合金可用于制造餐具。以下应用虽不够显现却同样在扩大，铂系金属作为催化剂用于汽车排放控制装置和在人造纤维布料的生产中用于制造喷丝头，银应用于照相处理工艺，金、钯及其合金在印刷电路板组件上的应用，银、金和铂系金属还用于电接触件，含有铂的金属有机化合物用于癌症化疗药物以及许多其他应用。

贵重金属工业

资源和消耗

银。美国尽管作为银矿的世界第三大生产国，占有世界银矿出口的 10%，但它还是银的净进口国。1996 年的进口，包括精炼和非精炼银大约有 3000t 进口到美国。再加上国内用矿石生产的 1800t，并且利用粗矿和二次原料(废料)的冶炼，使美国银的总产量达到 8600t(1996 年约有 2000t 是用回收材料再生的)。其中约 25% 的粗银主要从银矿中得到，其余的粗银来之于冶炼铜、铅、锌和其他金属所得的副产品。此外，还有可观的银产量来源于金矿的副产品。银矿生产居前的州按产量大小依次为内华达州、爱达荷州和亚利桑那州。它们的产量接近美国国内产量的 2/3。

银有许多用途，其范围从装饰到实用。美国银消耗中的约 50% 用于照相业的生产。银在照相业中的应用是以经过曝光的卤化银所具有的二次影像放大的能力为依据的(即胶片的冲洗)。其他主要的终端应用领域包括电器和电子产品，如一些电池(20% 的消耗量)和电镀器件、纯银制品和珠宝(10% 的消耗量)。其余 20% 的银消耗量用于如硬钎焊合金、牙科和医用产品、催化剂、轴承、镜面、硬币、纪念章以及其他的纪念物品。

金。美国是世界上第二大黄金生产国。1996 年美国开采了差不多 325t 的黄金。为了满足消费者和工业的需求，1996 年还另外进口了 143t，大部分都是经冶炼的金属。

美国冶炼生产中的约 50% 来自于金矿石，而其余出自冶炼铜和其他粗金属的副产品。美国的冶炼生产包括源自国产金矿、进口金矿和粗金锭，还有国内外的废料。近年来美国冶炼生产中的约 5%～10% 使用进口的矿石、粗金锭和废料。

美国生产的黄金中约有 5%～10% 来自于旧废料，它们是指使用后的废弃金属。而新废料则是在生产制造过程中产生的，通常由制造商自行回收的并不计入市场的供应量内。

美国拥有相当可观的黄金资源，其中一些有一定的开采价值。目前的价格还是足以使生产以适度的速度增长的，但是砂金矿床的环境约束和如今开采矿藏的高成本，促使美国还将进口大部分的黄金。

最大的黄金生产国是南非，在估计的 2250000kg 的黄金中已开采了 498000kg。其他重要的生产国或地区为俄罗斯、加拿大、南美洲、亚洲和大洋洲。

黄金的单独终端应用是珠宝，其占有黄金总消耗量的约 55%。在美国，1996 年的黄金珠宝的销售超过 120 亿美元。由于其超电导率、耐腐蚀性和其他所需要的物理和力学性能组合，黄金已显现成为一种基础的工业材料(约为黄金消耗量的 37%)。黄金还在计算机、通信设备、宇宙飞船、喷气式飞机发动机以及大量其他产品中也发挥关键的作用。除珠宝和工业产品之外，黄金还广泛用于牙科。

铂系金属。它们属于最为稀有的金属元素，为此价格昂贵。它们作为天然合金或成为无机化合物而生成在砂积矿床里，有时与黄金共生在一起，它们也产生在碱性或超碱性的岩石里，它们在那里与镍、铜同时发现。目前世界上供应的铂系金属大部分都是从南非、俄罗斯和加拿大的岩脉矿藏中冶炼得到。南非是惟一能大量生产所有这六种铂系金属的国家。

铂系金属在美国的主要用途是汽车和轻型卡车的催化的排放净化器，用于减少排放气体中的一氧化碳、未燃烧净的烃类和氧化氮，并达到其排放标准的

允许值。其他的汽车应用包括氧传感器和某种类型的火花塞，它们都使用少量的铂。

铂系金属的非汽车应用也不少。在炼油工业中，铂系金属，主要为铂，应用于重整、裂化和异构化反应。其他的铂系催化剂应用包括利用铂和铑的硝酸和氢氰酸的合成，以及利用钯生产过氧化氢。铂系的金属催化剂还能用于生产各种不同的有机化学物质。

铂系金属在电子方面的应用包括利用钌生产厚膜电阻、利用钯生产厚膜导体，将铂"靶"用于在电路板上溅射薄膜。铂-铑合金可制造用于精密测量温度的热电偶。

此外，铂、铑和钯还用于喷丝头衬套，玻璃纤维的纺丝(连续纤丝)就是通过它挤制而成的，钯还可作为牙科合金使用，而且铂、钯和铑都能用在珠宝上。

近年来，美国对于铂系金属的需求构成如下：

终端用途	消耗/kg	市场份额(%)
汽车	29957	35
化学物质	4654	6
牙科和医药	6974	9
电器/电子	23698	31
玻璃	810	1
珠宝/装饰	818	1
石油	4762	6
其他	8814	11
合计	77487	

引自：美国，地质科学。

在六种铂系金属中，铂和钯是工业上最为重要的，占铂系金属的全部消耗的92%。

商贸业务

贵重金属的买卖是以英两(troy ounce,金衡制)为单位的，在市场上也用公制单位公斤进行。一kg等于32.15英两。金衡制的重量基础是其一英两为480格令(或英厘,grain)、31.1克或20英钱(pennyweight)。一英两等于1.097常衡制英两。

成色一词指的是合金中银或金所占的重量比例，表达为千分之多少。例如成色为1000的银(也称为足银)就是纯银，或100%银，和1000足金就是100%纯金。市场上买卖的金锭是至少995足金或更高。英币银是925足银或925部分(92.5%)的银和75部分(7.5%)铜。直到1964年，美国硬币银是一种90% Ag和10% Cu的合金。贸易中用的银锭的银含量从999到999.9的成色。存在于任何成色的银锭中的金和铜都属于杂质。

金的纯度的另一种表示方法就是"开"(karat)，以等于纯金的1/24为其成色单位。在这个体系当中，24开(24k)金就是1000足金或纯金。美国最为通用的珠宝用黄金为：

开(karat)标号	金含量
24	100% Au(99.95%最小)
18	18/24或75% Au
14	14/24或58.33% Au
10	10/24或41.67% Au

用于珠宝的金合金都是用开表示其规格，而用于牙科和电子用途的则要用百分比。

在美国由联邦贸易委员会制定的有关珠宝的商贸规则规定，任何挂牌为黄金的饰件最低含量为10k金，允许误差为1/2k，用黄金包覆时(用黄金包覆在基体金属的坯件上)，必须标明材料的质量比以及包覆的开值。例如十分之一12k包金件是一种基体金属表面具有一层或多层的12k金合金的包层，而且包层的质量占整个复合件质量之比达10%。如果鉴定该物件的含金量，则应约为5%金。

包金的标号需符合在物件上的打印规则，物件上的包层重量至少应为总重量的1/20。较低的比值可以打印在滚金上。低于10k的合金不得在其物件表面使用质量标记。对于包金和滚金材料，可采用软钎焊、硬钎焊、焊接或机械的方法将开金固结在基体金属的底面上。

铂所要求的纯度随其不同的终端用途而异。虽然商用牌号的铂必须至少达到99.8%的纯度，但用于合金元素、实验室试件和接触件的铂纯度要求不低于99.9%。用于其他一些特殊用途，如热电偶和电阻温度计的铂有时甚至需通过控制杂质达到更高的纯度。现在美国的温度计所用的铂牌号Pt67的纯度为99.999%。

联邦规则规定只有含有不低于98.5%的铂系金属商贸物件才能标明为铂，其中含除铂以外的其他铂系金属亦不得超过5%，即这种材料至少要含有93.5% Pt。需特殊打印保障措施的还包括一些珠宝合金。英国所有出售的铂珠宝都必须打上纯度检验标记。

用于牙科用途的合金成分是相当复杂的，并且其冶金学方面的考虑也是它们在设计中的突出因素。美国牙科学会和联邦政府已经制定了各种技术标准。

性能、产品形式和应用

性能特征

贵重金属共享许多有别于其他金属或合金的性能，包括耐腐蚀和氧化性、良好的导电性、催化活性和极佳的反射性。然而，如下面将要描述的那样，这些合金的每一种都有其独特的特征。表3.11-1～表3.11-4概括了贵重金属的一些较为重要的性能特征。表3.11-1列出其结构和物理性质。表3.11-2和表3.11-3比较了这些金属的氧化和腐蚀性质。这两张表旨在为纯贵重金属如何发挥其作用给出一般性的描述，但不应将其作为依据用于为特定用途的材料选择。对于大部分的应用来说，合金比纯金属更加适用，因为合金元素的加入能提高其强度和由此引起其他性质的变化。表3.11-4比较了贵重金属的加工特性。如该表所示，一些贵重金属（例如金和银）容易加工，而另一些（如锇）几乎无法加工。

表3.11-1　所选贵重金属的性能

性　能	金　属							
	铂	钯	铱	铑	锇	钌	金	银
晶体结构	fcc	fcc	fcc	fcc	hcp	hcp	fcc	fcc
密度 20℃(70℉)/[g/cm³(lb/in³)]	21.45 (0.774)	12.02 (0.434)	22.65 (0.818)	12.41 (0.448)	22.61 (0.816)	12.45 (0.449)	19.32 (0.697)	10.49 (0.378)
熔点/℃(℉)	1769 (3216)	1554 (2829)	2447 (4437)	1963 (3565)	3045 (5513)	2310 (4190)	1064.4 (1948)	961.9 (1763.4)
沸点/℃(℉)	3800 (6870)	2900 (5250)	4500 (8130)	3700 (6690)	5020±100 (9070±180)	4080±100 (7375±180)	2808 (5086)	2210 (4010)
电阻率/μΩ·cm，在0℃(32℉)时	9.85	9.93	4.71	4.33	8.12	6.80	2.06	1.59
线膨胀系数/[μin/(in/℃)]	9.1	11.1	6.8	8.3	6.1	9.1	14.16	19.68
抗拉强度/MPa(ksi)								
加工后的线材	207～241 (30～35)	324～414 (47～60)	2070～2480 (300～360)①	1379～1586 (200～230)①	—	496(72)①	207～221 (30～32)	290(42)
经退火的线材	124～165 (18～24)	145～228 (21～33)	1103～1241 (160～180)	827～896 (120～130)	—	—	124～138 (18～20)	125～186 (18.2～27)
50mm(2in)长的伸长率(%)								
加工后的线材	1～3	1.5～2.5	15～18①	2	—	3①	4	3～5
经退火的线材	30～40	29～34	20～22	30～35	—	—	39～45	43～50
硬度 HV								
加工后的线材	90～95	105～110	600～700①	—	—	—	55～60	—
经退火的线材	37～42	37～44	200～240	120～140	300～670	200～350	25～27	25～30

（续）

性　能	金　属							
	铂	钯	铱	铑	锇	钌	金	银
硬度　HV								
铸造的	43	44	210～240	—	800	170～450	33～35	—
弹性模量20℃（70 ℉）/ GPa（10^6psi）								
静态	171(24.8)	115(16.7)	517(75)	319(46.5)	558(81)	414(60)	77(11.2)	74(10.8)
动态	169(24.5)	121(17.6)	527(76.5)	378(54.8)	—	476(69)	—	—
泊松比	0.39	0.39	0.26	0.26	—	—	0.42	0.37②

注：fcc，面心立方；hcp，紧凑六角立方。

①热变形加工。　②退火。

引自：Engelhard Industries Division，Engelhard Corporation。

表3.11-2　贵重金属的氧化特性

金　属	氧 化 特 性
钌	在室温和甚至严重的污染环境中不会锈蚀。当在空气或氧气加热到约800℃（1470℉）时，它会被氧化生成二氧化钌的表面膜，在此与1150℃（2100℉）的温度之间形成挥发性氧化物
铑	在空气和室温甚至最为严酷的大气条件中也不会锈蚀。在空气中加热到600℃（1110℉）以上，产生看似颜色变暗的氧化薄膜。在空气中、正常大气压下并温度大约为1100℃（2010℉）时，以及在氧气中和稍高的温度时该氧化膜分解，在更高的温度下形成挥发性氧化物
钯	在普通温度、干燥或潮湿的空气中不会锈蚀。在400～800℃（750～1450℉）之间在空气中生成薄氧化膜。在较高的温度中，表面氧化物分解留下洁净的金属表面。温度超过1000℃（1830℉）以上发生挥发
银	在普通温度下耐干燥或潮湿的空气。在稍高的温度下生成氧化银薄膜。超过约455℃（850℉）并在大气压下存在的氧化银分解，再次留下洁净的表面。内部疏松是一个高温中的问题
锇	即使在室温里也会缓慢氧化形成四氧化锇，到130℃（265℉）沸腾并有剧毒
铱	室温里不会锈蚀，但在空气中加热到600℃（1110℉）以上，将产生薄氧化物锈蚀。到1000℃（1110℉）以上形成挥发性氧化物
铂	在所有的温度直到熔点1769℃（3216℉）均耐氧化
金	在所有的温度直到熔点1064℃（1948℉）均耐氧化

表3.11-3　贵重金属的腐蚀特性

金　属	腐 蚀 特 性
钌	耐王水，耐所有的酸温度高达100℃
铑	耐沸腾王水和热HCl，耐热Cl
钯	耐腐蚀性比铂差，在高氧化环境中耐腐蚀性很差
银	耐食物和许多高浓度的有机酸溶液、耐热苛性碱溶液、耐湿Cl_2气，但不能超过室温
锇	耐腐蚀性比其他铂系金属差一些
铱	耐沸腾王水和热HCl，耐热Cl
铂	耐高温的HNO_3、HF和H_2SO_4，耐过氯酸盐、过硫酸盐和次氯酸盐，耐高温Cl很差
金	耐高温的HNO_3和H_2SO_4，耐高温的干HCl气体，会被HNO_3+HCl和HNO_3+H_2SO_4的混合物所腐蚀，超过80℃耐Cl很差

表3.11-4 贵重金属的加工特性

金　属	加工特性
钌	有限的锻压成形，只能用粉末冶金技术加工。虽然可以在1050～1250℃（1920～2280℉）内轧制棒材和带材，但可以在1150～1500℃（2100～2730℉）中进行热变形加工。由于钌的低塑性，故冷变形加工有限
铑	烧结锭和铸锭可以在1200℃（2190℉）温度下热变形加工。可以较薄的厚度进行冷变形加工
钯	在室温里容易加工
银	在室温里容易加工。在周期表中仅次于金，银最容易加工
锇	在任何温度下都几乎无法加工。可以生产一些粉末冶金产品
铱	烧结锭或铸锭可以在1200～1500℃（2190～2730℉）里借助热变形加工切断。然后在600～700℃（1110～1380℉）的温度下进行拉制或轧制
铂	在室温里容易加工。一般热加工始于1000℃（1830℉）
金	在室温里容易加工

产品形式

锻压产品。银、金、铂、钯和铑都能拉制成圆棒和直径细到25μm(0.001in)的线材。铱可以拉制直径细到75μm(0.003in)。有些含有铱或铑的铂合金可以拉到直径7.5μm(0.0003in)。

薄板、带材、窄带和箔都能按很宽范围的合金、尺寸和厚度进行生产。银、金、铂及它们的一些合金可以轧制到厚度只有2.5μm(0.0001in)，但是其公差无法保证。利用种类繁多的衬底材料能生产出如线材、薄板、带材以及成形零件的各种包覆材料。

管材的生产也有很大的尺寸范围以及圆形、半圆形和方形的各种截面形状。用铂、钯、金及其大部分的合金都能制成无缝管，其尺寸范围外径从0.4mm(0.016in)×壁厚0.1mm(0.004in)到44mm(1.750in)×壁厚5mm(0.200in)。尺寸更大的管子或者以塑性较差的材料，如含有铑(≥25%)或铱(>25%)铂合金只能制成内径3～75mm(1/8～3in)×壁厚0.25～2.5mm(0.010～1.00in)的有缝管。通常还有纯铑和纯铱的有缝管供货，其内径3～40mm(1/8～1½in)×壁厚0.25～0.6mm(0.010～0.025in)，且单根管长度为150mm(6in)。另外还可以生产用铂、金、银或其他任何商用贵重金属合金作为外包覆或内衬里的基底金属管。

贵重金属粉末。其生产广泛应用于电子和工业的用途。电子粉末是一种通过化学析出而形成的小于10μm的颗粒，故趋向于高表面积。它们在混合电路上用作印剂。片形粉末用于产生更为亮丽、光滑的薄膜，而球形颗粒较多地形成无光泽外观的表面。铂、钯、40Pt-20Pd-40Au、10Pt-20Pd-70Au、7.5Pt-22.5Pd-70Au和75Au-25Pd粉末都已用于电子用途。通常有必要通过试用，根据其成本和性能来确定最为适用的粉末。

在工业上应用的粉末根据大小要求由范围从2～3μm一直大到840μm(20目)的颗粒混合组成。这些粉末适用于粉末冶金零件、作为保护镀层对付有害的工业环境、作为原材料用于合金制造以及各种其他用途。

镀层。除了锇以外的所有贵重金属都能用于金属的精整加工，无论作为装饰表面还是作为工业应用。最常见的是这些金属都通过电沉积(电镀)而利用的，而其他工艺如热或机械包覆、真空沉积以及其他各种形成薄膜或厚膜的方法也都能用于一些特殊的用途。有关贵重金属镀层的进一步内容可参阅本手册“表面工程”一章。

银和银合金

银是以其光亮的外观、高导热导电性、反射性和非常高的可锻性为特征的。它具有在多种有机酸和氢氧化钠、氢氧化钾里的耐腐蚀性，但是它对于无机酸很敏感。它能在室温里耐氧化，但是对于硫的侵蚀却很敏感。此外，氧在固态银比在其他任何金属中更容易弥散通过。这种情况使之能从其内部氧化某些合金元素如镉，从而通过银的弥散强化而应用于电接触件。

硬钎焊合金。不同的标准规定了种类繁多的用于银基硬钎焊条的金属合金，最为知名的是ASME SFA5.8和AWS A5.8，由其规定的合金牌号形式为Bag-x。这些合金都是以低熔点温度为特征而且能够润湿固态基体金属，因此它们适用于硬钎焊钢、铸

铁、不锈钢和铜合金的自身或相互之间的焊条金属。它们还应用于一些活性和耐熔金属的硬钎焊，尽管后者仅限于低温使用。

这些硬钎焊合金一般为 Ag-Cu-Zn 合金，有些还含有镉、锰、镍、锡或锂。其中应用最广的是合金 BAg-1（UNS P07450，含 45% Ag、15% Cu、16% Zn 和 24% Cd）和 BAg-1a（UNS P07500，含 50% Ag、15% Cu、16% Zn 和 18% Cd）。镉的加入使这些合金具有特别低的熔化温度、较窄的熔化温度范围以及较高的流动性。其他硬钎焊合金还包括 BAg-2（UNS P07350，含 35% Ag、26% Cu、21% Zn 和 18% Cd）和 BAg-2a（UNS P07300，含 30% Ag、27% Cu、23% Zn 和 20% Cd），它们含有较少的银，故较便宜，但是其熔化温度较高和流动性较差。在食物处理的用途中必须考虑毒性问题，必须采用不含有镉的硬钎焊合金，这些合金包括 BAg-4（UNS P07400，含 40% Ag、30% Cu、28% Zn 和 2% Ni）、BAg-5（UNS P07453，含 45% Ag、30% Cu 和 25% Zn）、BAg-20（UNS P07301，含 30% Ag、38% Cu 和 32% Zn）和 BAg-28（UNS P07401，含 40% Ag、30% Cu、28% Zn 和 2% Sn）。用于不锈钢的硬钎焊的含镍合金 BAg-3（UNS P07501，含 50% Ag、15% Cu、16% Zn、16% Cd 和 3% Ni）是最常用的，但许多其他银基硬钎焊合金也有使用。真空硬钎焊牌号、BVAg-x 也可以使用。这些焊条金属对于许多具有高蒸汽压的杂质——主要为镉、磷和锌，都规定有其最高含量。有关银基硬钎焊条金属的选用和性质的其他内容可参阅本手册“连接”一章。

电接触件。银是在中载和重载电接触件中很有用的材料，特别当其合金含有弥散的氧化镉时。为此银所具有的优点源自其高导热、导电性和低表面接触电阻性，还具有氧化镉颗粒所赋予的防止粘结和焊死的发生、将电弧侵蚀降低到最小的能力。在轻载（低电压、小电流）条件下，这些材料并不适用，因为银易于与空气中的硫反应生成硫化物的表面层。通过粉末冶金工艺或内部氧化（例如 Ag-15% CdO 合金）形成氧化镉弥散粒子。作为电接触材料的应用，分别含有约 0.25% 的镁、镍和有时还有铜的银合金都能通过内部氧化进行弥散强化。用于电接触用途的其他银基合金包括用于小电流用途的足银以及含有铜、钯、铂或金的银合金。这些合金元素提高硬度，但降低导电性。有关用于电接触的银和银基合金的其他内容可参阅本手册“特种用途材料”一章。

珠宝、餐具和货币。银的高反射性使之在珠宝和餐具上的应用特别诱人。它们借助于合金的使用而获得强度、硬度和耐磨性，尤其是含有 92.5% Ag 和 7.5% Cu 的货币银合金。有两种牌号的货币银合金——标准牌号（UNS P07931）和银器匠牌号（UNS P07932），后者的银和铜的含量允差比较小。传统的银币合金为含有铜的银合金（例如 Ag-10% Cu）。

牙汞齐合金。这是一种用于修补缺失牙齿结构的银-汞合金。通常将其称为银填料。它基本上是一种主要由金属间化合物 γ（Ag_3Sn）和 γ_1（Ag_2Hg_3），以及根据铜的含量再加入少量的 γ_2（Sn_7Hg）或 η′（Cu_6Sn_5）所组成的金属复合物。

牙汞齐合金一般含有 40%～50% Hg、20%～35% Ag、12%～15% Sn、2%～15% Cu 和不到 1% Zn。然而，可适用的技术标准仅能用于制备汞齐合金的银-锡颗粒和液态汞，即 ANSI-MD156.1 和 ISO R1559 的银锡合金和 NSI-MD1556.6 和 ISO R156 0 的汞。所用合金颗粒的成分极限值为 65% Ag 最低、29% Sn 最高、6% Cu 最高、3% Hg 最高、2% Zn 最高。这些极限值可以超过或添加其他元素，但如果这样的话，制造商必须提供成分和相应的生物和临床试验结果，以此证明按照制造商的使用说明最终汞齐在口腔里是安全和有效的。例如，有较高含铜量的合金都已表明其抗蠕变性、耐腐蚀性和耐久性都得到了改善，而且不会产生不该有的生物反应。

其他应用。银可以作为催化剂应用于化学反应，如乙烯的氧化，应用于以甲醇生产甲醛以及作为一种坩埚材料用于熔化 NaOH。它能制造极佳的可见光和红外光的反射器，并且借助于真空升华金属化工艺应用于玻璃和陶瓷。它还能以一种银-氧化银复合物的形式作为电池板得到特殊应用。

银在轴承中的应用很大程度上受限于非合金化银（AMS 4815）在钢轴瓦上的电镀，然后加工到非常小的尺寸公差并最后精密电镀软金属的薄镀层到尺寸并形成。镀层可以是铅-锡、铅-锡-铜、铅-铟，或在某些情况下采用纯铅。作为一种轴承材料，镀银总是用一层镀层。银在钢上具有一层镀层，被认为是最耐疲劳的轴承材料。

金及其合金

金是一种光亮、悦目的黄色金属，其性能可通过合金化得到改善。它具有非常高的可塑性，热、电传导性和极佳的耐腐蚀性包括耐氧化和硫化（即生锈）。这种性能的组合使得金及其合金在珠宝和牙科方面拥有传统的应用，还在一些重要工业领域获得应用。

珠宝。金及其合金乃是应用最为普遍的珠宝金属，而且已经延续了数千年。珠宝合金是按照开值和色泽的描述进行分类的。应用最广的合金为 14 开金

(58% Au)、18 开金(75% Au)和 10 开金(42% Au)。作为合金的其余元素为银和基体金属铜、锌和镍。其每一种合金元素都会对金的色泽产生不同的影响：

- 银：随着银的百分比增加，金的色泽由黄转黄绿色而变为白色；
- 铜：随着铜的含量增加，金的色泽转变为带有浅红色的；
- 镍：镍会使金的色泽变白，所谓的白色金就是用镍代替银；
- 锌：锌一般认为会使其色泽变差。

按 18 开金而言，绿金为金-银合金(如 UNS P00280)而红金为金-铜合金(UNS P00285)，然而 Ag-Au-Cu 则为黄色的(UNS P00250、UNS P00255、UNS P00260)。红 18 开金加工困难，因为它在固态下发生一种使其提高强度和降低塑性的有序化转变。10 开和 14 开金合金都是以 Ag-Au-Cu 系统为基础的(如 14 开黄金 UMS P00180、P00190、P00200、P00220)，这些合金的性能主要取决于银与铜之间的比例而不是金的含量。白色金不是加入 5%~12% Zn 的 Ag-Au-Cu 合金(如 10 开合金 UNS P00125)，就是也含有锌的 Au-Ni-Cu 系合金(如 14 开合金 UNS P00150、P00160)。Au-Ni-Cu 白色金比较硬，但是在轻度加工后进行退火时易于发生开裂("火裂")。

电器和电子方面的应用。金在电子装置上有相当程度的应用，特别在印刷电路板、接插件、键盘接触器和微型电路上。由于电子装置使用的是低电压和小电流，所以在设备的寿命里始终让其镀层元件保持没有锈蚀膜并且维持化学和冶金学的稳定性是很重要的。

金以电镀的形式应用于有镀面插头型的电接插件和高频导电体，并且能在银也会发生腐蚀的各种环境里使用。含有 70% Au 的金-银合金一般还含有百分之几的铂，能耐氧化和硫化作用，此外还具有其他一些有利于低电流接触的性质。

金硬钎焊合金。用于连接一些在喷气和火箭发动机中用镍基或钴基超合金或不锈钢制造的元器件。这时因为基体金属的合金化程度降到最小，故其连接的塑性要高。它们也用于连接密闭的真空管元件，这时的低蒸汽压力是其优点。普通硬钎焊合金包括金-铜合金如 BAu-1(UMS P00375，含 38% Au、62% Cu)、BAu-2(UMS P00800，含 80% Au、20% Cu)和 BAu-3(UMS P00350，含 35% Au、62% Cu、3% Ni)，金-镍合金如 BAu-4(UMS P00820，含 82% Au、18% Ni)以及 Au-Ni-Pd 合金如 BAu-5(UMS P00300，含 30% Au、36% Ni、34% Pd)和 BAu-6(UMS P00700，含 70% Au、22% Ni、8% Pd)。就像银基的硬钎焊合金一样，通过金硬钎焊合金成分的改进使其能应用于真空硬钎焊的用途。

其他用途。金能很好地反射光谱中的红和红外部分光的辐射，因此能作为镀层应用于红外反射器和加热、干燥的装置里，还包括隔热窗、宇宙飞船的元件和宇航服。金合金在牙科中还能广泛应用于牙冠和齿桥合金、镶嵌材料以及烤瓷熔附的金属合金。在其合金中还使用许多其他成分，典型的金-银合金里含有钯、铜和锌。

铂系金属

铂及其合金。铂是铂系金属中蕴藏最为丰富且应用最为广泛的一种。它的应用是由于具有耐腐蚀性、高熔点、塑性、电子学性质和表体外观等性质。铂即便在空气中加热至熔点仍能保持其光亮，并仅溶解于能产生游离氯的酸里，如王水。

铂及其合金最普通的用途就是作为一种催化剂使用。对氧化而言，铂作为一种极佳催化剂，在如 H_2SO_4 和 HNO_3 的生产中应用；在如维生素及其他化学物质的生产中用于氢化；以及用于石油重整工艺如在高辛烷值汽油的生产中。以铂-钯合金形式的催化剂占有铂单独使用中的最大份额。铂-钯合金也应用于珠宝、电极和电接触等方面。含量达 30% Ir 的铂-铱合金应用于实验室器具、珠宝、电接触件和电极，以及制造很细的管材。铂-铑合金(达 40% Rh，但以 Pt-10% Rh 为最普通)应用于高温的氧化条件下，除了作为催化剂使用外，还作为一种炉用的元素材料(10%、20% 或 40% Rh)和作为标准热电偶合金(10%、13% 和 30% Rh)使用。铂-铑合金还用于玻璃工业的坩埚和模具，在合成纤维的喷丝头以及挤制玻璃纤维的导套。铂-钌合金(5~11% Ru)应用于电接触件、珠宝和注射用针头。而强度非常高的合金 Pt-15% Rh-6% Ru 以线材的形式用于各种用途，包括绕线电器。Pt-8% W 线材广泛用于电器、电子和生化的用途。Pt-10% Ni 有突出的高温强度。Pt-23% Co(即原子百分数 50% 的 Co)是一种具有特别高矫顽力的永久磁性材料。通过让合金含有一种弥散分布的氧化锆，铂及其合金在高温下的抗蠕变性会得到大大改善，即代号为 ZGS(氧化锆-晶粒-稳定化)的铂及其合金。这些材料可以在玻璃工业中得到应用，用于导套、搅拌器和存储装置。

钯及其合金。钯的外观、塑性和强度与铂相似，但是熔点和耐腐蚀/锈蚀都比较低，密度则低得更多。总的来说，它在铂系元素中，作为电接触材料的广泛应用中仅次于铂。钯作为催化剂合金元件应用于汽车

工业，而且钯合金催化剂还应用于化学工业和制药业。钯的其他用途还在医药和牙科材料、珠宝和硬钎焊合金等方面。它也能用于电镀、电铸和化学沉积。

最低99.8%Pd(UNS P03980)工业纯的钯在诸如电话系统里，用于继电器一类的轻载电接触件用途。钯-银合金也可作为电接触材料使用，并且Pd-40%Ag合金也能用于精密电阻丝和作为一种弥散膜片用于将氢气与其他气体隔离。电接触件还可以用钯-铜(40%Cu)合金和Pd-Ag-Cu合金如UNS P03440(38%Ag、16%Cu、1%Pt)和UNS P03350(30%Ag、14%Cu、10%Pt、10%Au)制造。后一种合金可以进行析出硬化，使之适合要求耐滑动磨损或弹性的接触件用途。有一些Pd-Ag-Au合金能固溶强化，但还有其他一些能析出硬化。这些都能用于牙科的应用，和以包覆层的形式用于严重腐蚀的用途里，尤其在氢卤酸里。用于硬钎焊的合金包括钯-钴合金如真空硬钎焊合金BVPd-1(UNS P03657,65% Pd-35% Co)。Pd-4.5%Ru是一种以铸造和锻压形式的标准珠宝合金，而高达12%Ru的钯-钌合金也能用于电接触件。

其余的铂系金属。铑、铱、钌和锇都是硬白金属，在室温下几乎没有塑性。它们主要作为合金元素用于其他贵重金属里。

铑偶尔制成非合金化形式，但较为常用的是作为铂的合金元素，其次是作为钯的合金元素。它也能以镀层用于珠宝，以此增加白色度和耐磨性。铑的颜色在铂系金属中是最白的。

非合金化形式的铱用于制造大型坩埚，坩埚应用于作为磁泡存储器基片的钇-铝-柘榴石和钆-镓-柘榴石的单晶体生产。铱坩埚还能用于温度高达2100℃(3800℉)的非金属材料熔化。铱的密度是所有金属中最高的，而且是仅能在短时间内用于2000℃(3650℉)，也可作为合金元素用于铂和铑。

钌主要作为合金元素用于铂和钯。当铑、铱和钌以合金元素加入到铂或钯中时(有效性依次增加)，它们起到硬化剂的作用。

锇是铂系金属中最为稀少的，在相当低的温度下会形成有毒的氧化物，所以是一种难以利用的金属。作为一种合金元素使用，它可为其他贵重金属提供极高的硬度和耐腐蚀性。

精选参考文献

- E.B. Amey, *Gold*, U.S. Geological Survey, Minerals Information, 1996.
- A. Butts and C.D. Coxe, Ed., *Silver: Economics, Metallurgy, and Use*, R.E. Krieger Publishing, 1967.
- H.E. Hilliard, *Platinum-Group Metals*, U.S. Geological Survey, Minerals Information, 1996.
- H.E. Hilliard, *Silver*, U.S. Geological Survey, Minerals Information, 1996.
- A.A. Johnson and J.A. von Fraunhofer, Precious Metals, *Metals Handbook Desk Edition*, American Society for Metals, 1984, p to 13–1 to 13–6.
- Precious Metals in Dentistry, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 695–698.
- Properties of Precious Metals, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 699–719.
- E. Savitsky, V. Polyakova, N. Gorina, and N. Roshan, *The Physical Metallurgy of the Platinum Metals*, M.I.R. Publishers, 1975 (Translated by I.V. Sarin and published by Pergamon Press in 1978).
- G.D. Smith and E. Zysk, Corrosion of the Noble Metals, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 793–807.
- E.M. Wise, *Gold: Recovery, Properties, and Applications*, Van Nostrand, 1964.

第12章 高熔点金属及其合金

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM手册》第2卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，557~585页，《ASM特种手册》耐热材料，1997，361~382页，其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

高熔点金属包括铌（过去名为钶）、钽、钼、钨和铼。除了铂系金属中的两种金属锇和铱以外，高熔点金属具有最高的熔化温度（>2000℃或3630℉）和所有金属中最低的蒸汽压力。它们在中低温度的氧化环境里容易因氧化而降低品质，这是一个限制其作为高温材料应用的性质。现已开发出保护镀层系统大多用于铌合金，使它们能应用于高温氧化的航天的用途。

高熔点金属过去只是限于在灯丝、电子管栅极、加热元件和电接触器上使用。然而，后来又在航天、电子、核与高能物理以及化学工业方面得到应用。除铼以外每一种高熔点金属在世界范围里每年的消耗都在900t以上。

图3.12-1和图3.12-2比较了温度与高熔点金属的抗拉强度和弹性模量的相互关系。铼的六方密排（hcp）数值十分有别于其他金属的体心立方形（bcc）结构。高熔点金属及其合金的性能还对纯度、工艺和其他因素表现敏感。表3.12-1和图3.12-3对高熔点金属及其合金的高温数据进行了比较。

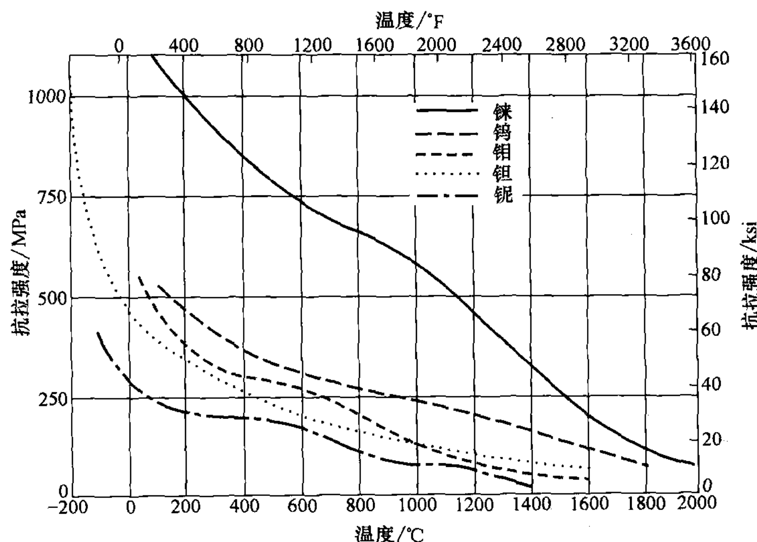


图3.12-1 纯（非合金化）高熔点金属的抗拉强度和试验温度的关系

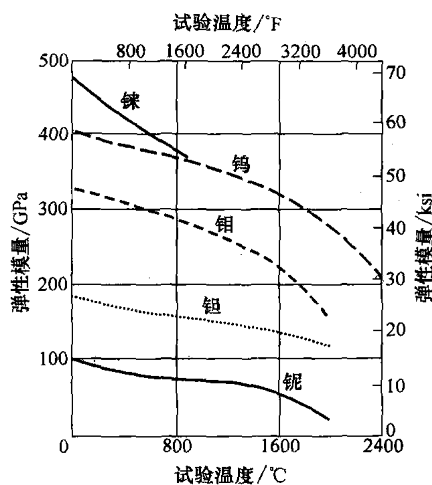


图3.12-2 纯（非合金化）高熔点金属的试验温度与弹性模量之间的关系

钼及其合金

钼将高熔点（2610℃或4730℉）与高温下的强度结合在一起。钼的优势还在于其高的比弹性模量，以此对于同时要求刚性高和重量轻的用途特别适用。这种金属的高热导率、低线膨胀系数和低比热容，更使其具有抗热震性和抗疲劳性，这些性能对于电子工业用途也很重要。此外，钼在种类繁多的化学介质中都很稳定，且它有良好的导电性，尽管材料在选择时很少将这种物理性质作为关键性的因素。

每年钼的消耗多于其他高熔点金属。大部分钼都是作为合金元素用于铁、钢和超合金，用以提高淬硬性、韧性、耐磨料磨损、耐腐蚀性以及强度和高温下的抗蠕变性。钼基轧制产品占总用途的约5%。其用途包括电器和电子零件、火箭和飞机

表3.12-1　高熔点金属合金的性质比较

名义合金添加（质量分数,%）	普通代号	最普通的产品形式	常用状态①	低温塑性等级②	典型高温强度			
					温度/℃	抗拉强度/MPa	温度/℃	10h 的断裂强度/MPa
铌及其合金								
无	非合金化 Nb	所有	Rx	A	1095	69	1095	37
1Zr	NB-1Zr	所有	Rx	A	1095	158	1095	96
1Zr，0.1C	PWC-11	所有	Rx	A	1095	130	—	—
10Hf，1Ti，0.7Zr	C-103(KBI3)	所有	Rx	A	1095	186	—	—
10Ta，10W	SCb-291	棒材，薄板	Rx	A	1095	220	1095	62
10W，10Hf，0.1Y	C-129Y	薄板	Rx	A	1315	179	1095	103
28Ta，11W，0.8Zr	FS-85	薄板	Rx	A	1315	158	1315	83
钼及其合金								
无	非合金化 Mo③	所有	SRA	B-C	1000	50	980	175
0.5Ti，0.08Zr，0.03C	TZM(MT-104)③	所有	SRA	B-C	1000	600	1315	140
1.2Ti，0.3Zr，0.1C	TZC	所有	SRA	B-C	1000	800	1315	190
1.2Hf，0.05C	MHC(HCM)	所有	SRA	B-C	1000	800	1315	210
0.5Zr，1.5Hf，0.2C	ZHM	所有	SRA	B-C	1000	800	1400	200
25W	25W	所有	SRA	B-C	1000	330	—	—
30W	30W③	所有	SRA	B-C	1000	350	1095	140
1Hf，0.07C，25W	HWM-25(Mo25WH)	所有	SRA	C	1000	900	1300	200
5Re	5Re	所有	SRA 或 Rx	B	1000	400	1650	7
41Re	41Re	所有	SRA 或 Rx	B	1000	600	—	—
47.5Re	50Re	所有	SRA 或 Rx	B	1000	580	1600	27
0.5ZrO_2	Z-6	所有	SRA	B-C	1000	280	—	—
150K，300Si(ppm)	MH(HD)	线材，薄板	CW，SRA	B	1000	300	—	—
200K，300Si，100Al(ppm)	KW	线材，薄板	CW，SRA	B	1000	300	—	—
钽及其合金								
无	非合金化 Ta	所有	Rx	A	1315	59	1315	7
7.5W(P/M 合金)	FS-61	线材，带	CW	A	25	1140	—	—
2.5W，0.15Nb	FS-63	所有	Rx	A	95	315	—	—
25W	KBI-6	所有	Rx	A	95	315	—	—
10W	Ta-10W	所有	Rx	A	1315	345	1315	140
8W，2Hf	T-111	所有	Rx	A	1315	255	—	—

（续）

名义合金添加（质量分数,%）	普通代号	最普通的产品形式	常用状态①	低温塑性等级②	典型高温强度			
					温度/℃	抗拉强度/MPa	温度/℃	10h的断裂强度/MPa
钽及其合金								
8W，1Re，1Hf，0.025C	Astar811C	所有	Rx	A	1315	275	—	—
40Nb	KBI-40	所有	Rx	A	260	290	—	—
37.5Nb，2.5W，2Mo	KBI-41	所有	Rx	A	260	515	—	—
钨及其合金								
无	非合金化W	压制棒材	SRA	D	1000	620	—	—
		薄板，线材	SRA	D	1650	120	1650	50
无	非合金化W	CVD薄板	Rx	D	1000	565	—	—
Al，K，Si(ppm级)	掺杂AKSW	线材	CW	C	1650	650	—	—
$1ThO_2$	W-1%ThO_2	棒材，薄板，线材	SRA	D	1650	255	—	—
$2ThO_2$	W-2%ThO_2	棒材，薄板，线材	SRA	D	1650	205	1650	125
15Mo	W-15Mo	棒材，薄板	SRA	D	1650	250	1650	85
4Re	W-4Re	线材，窄带	SRA或Rx	C	1650	150	—	—
25Re	W-25Re	所有	SRA或Rx	B	1650	275	1650	85
4Re，HfC	W-4Re-HfC	线材	SRA	C	1650	620	—	—
铼								
无	非合金化Re③	所有	Rx	A	20	1172/2324④	1600	56
					500	786/1196④	2200	21
					1000	588/855④	2800	4.2
					1500	262/276④	—	—
					2000	—/103④	—	—
					2300	53/—④	—	—

①CW，冷变形加工；Rx，再结晶；SRA，消除应力退火。　②A，极佳的冷态下塑性；B，极佳的室温塑性；C，室温下有限的塑性；D，室温下一般脆性。　③P/M和电弧熔铸状态均可以。　④第一位数值，退火材料；第二位数值，冷变形加工到15%的锻压材料。

引自：参考文献[1]。

零件、高温炉窑的零件、热作工具、镗杆、热电偶、核能应用、耐腐蚀设备、玻璃熔化炉设备和金属喷涂，钼还能用于化学反应的催化剂。有关钼基轧制产品的ASTM标准包括B386（厚板、薄板、带材和箔材）和B387（棒材、圆棒和线材）。

工艺

钼及其合金可以通过真空电弧铸造（VAC）或者粉末冶金（P/M）技术进行熔凝。P/M坯块的压实又有机械压制和冷静等压（CIP）两种方法，虽然大部分P/M轧制产品都是来自于CIP的坯块。粉末金属坯块一般都是在氢气中烧结的，因为氢气能还原氧化钼并进一步纯化材料。也有一些生产厂家采用真空烧结。

挤压、轧制或锻造可以用于加工大型P/M坯块，但是VAC锭块必须首先进行热挤压因为在拉应力作用下，铸造态的材料有发生晶间断裂的倾向。在坯块

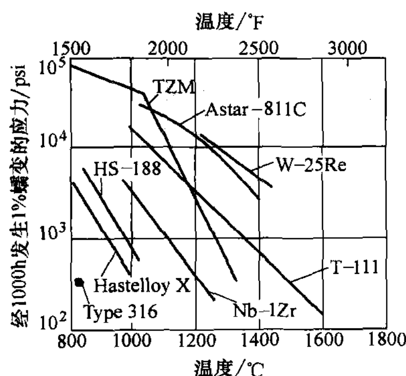


图3.12-3 各种不同高熔点金属合金的长时期蠕变特性，并与316型不锈钢、镍基超合金(Hastelloy X)和一种钴基超合金进行比较

和锭块压缩到合适的大小之后，材料可以用适当的轧制技术如热轧、冷轧或模锻进行加工。

钼基合金的种类

碳化物强化合金。它取决于细粒的活性金属碳化物的形成，以此弥散强化其材料，并提高其再结晶的温度，使其超过纯钼在加工过程中所形成的位错结构得到稳定化的温度。这些合金都是按照VAC和P/M两种牌号生产的。

碳化物强化合金是最早被商业化的钼合金。早期的合金Mo-0.5Ti在商业上已经不用了。它的高温强度和耐再结晶性通过加入大约0.08%的锆而得到改善，成为人们所熟悉的TZM。TZC是TZM的一种更高合金含量的改进型，其性能得到提高并得益于时效硬化热处理。然而，在工业上的合金选用方面，TZC并没有代替TZC，主要出于经济上的考虑。近些年来，用碳化铪(MHC)并结合活性金属碳化物(ZHM)强化的合金也已进入市场。表3.12-1列出了碳化物强化合金的高温强度性能。

TZM和MHC都在飞机燃气轮机发动机的镍基超合金零件的等温锻造中作为工具材料使用的。碳化物强化合金以其更高的强度代替超低碳纯钼应用于玻璃制造业也已引起人们的关注。

固溶型合金。钨和铼都是固溶钼合金中有价值的置换型元素。除了几种“标准”合金以外，其他成分的合金可以专门订货。除Mo-30W也能作为VAC的产品使用以外，固溶型钼合金通常采用P/M方法制造。

钼-钨合金的开发是为了利用其化学耐腐蚀性，它们主要用于处置熔化锌的设备。它们相对于纯钨在这些用途里有较低的成本、较轻的重量。钼-铼合金的商业价值在于所谓的“铼效应”，由此导致明显降低材料从塑性到脆性的转变温度(DBTT)。最为普通的合金含有5%、41%和50%(实际为47.5%)Re。5Re和41Re合金用于热电偶丝和航天行业里的结构用途。而W-50Re合金特别规定用于高温结构元件。

一种钼基合金——HWM-25(Mo-W-Hf-C)同时含有碳化物形成和置换型的元素，用以改善其高温强度。

弥散强化的P/M合金。它们依靠在粉末制造过程中加入或产生的二次相颗粒来提高其耐再结晶性，并稳定再结晶的晶粒结构。这种合金的高温强度得到提高而且使低温塑性又得到改善。

掺杂钼合金是最早弥散强化的材料。它们类似于用于灯丝的Al-K-Si掺杂钨合金(AKS钨)的开发方式。它们最初的研制是为了满足照明工业对于钼零件抗蠕变的要求。像MH和KW的掺杂合金(见表3.12-1)，在低温下并没有特别高的强度，但这种材料极耐再结晶，并具有极佳的抗蠕变能力。

活性金属氧化物的弥散能用于提高钼的高温强度和抗蠕变性。氧化锆弥散强化合金Z-6(0.5% ZrO_2)就是其一例。

钨及其合金

钨具有所有金属中最高的熔点(3410℃或6170℉)，而且位于密度最高之列，为19.26g/cm³。它还有超乎寻常的高弹性模量(414GPa或60psi × 10^6)并且是惟一弹性各向同性的金属。

钨的高熔点和低蒸汽压并伴之以能拉制成的细丝，从20世纪开始就担当了在灯丝上的商业应用。从20世纪50年代，核能和空间时代的开启更促使钨冶金技术的长足发展。今天，在航天发动机和核能生产方面，对于高温应用的需要更离不开钨及其合金。除了其高温性能外，钨的商业重要性还在于其高的密度、强度和弹性模量。

钨及其合金以轧制产品加以应用，作为一种合金元素用于工具钢和超合金、碳化钨切削刀具和各种各样的钨基化学物质里。就高熔点金属的消耗而言，钨排列在钼之后。切削刀具占了钨总消耗量的59%，轧制产品占26%，合金化元素占9%以及化学物质和其他应用占6%。

工艺

钨利用三种主要方法固结成为高的密度，其中两种为P/M工艺：固态烧结和机械压力加工(锻压P/M

钨)、粉末的液相烧结和化学气相沉积(CVD)。CVD钨的大部分应用包括薄壁管和双金属(包覆)结构目前尚处于开发阶段。钨及其合金也可以用电弧铸造或电子束熔化进行生产，但这些方法并无明显的商业价值。虽然熔化冶炼的钨有着比P/M或CVD产品更高的纯度，但是它在力学和物理性能方面的些许提高相对其高价格来说并不值得，也不能以此表明熔化钨的应用前景。

高密度非合金化钨的DBTT约为300℃(570℉)，而再结晶温度为1700℃(3090℉)。普通的形变热处理规范是使金属能在DBTT与再结晶温度之间进行变形。当这种变形量增加时，DBTT和再结晶的两种温度都要随之降低。于是在室温下，热轧钨棒是脆性的，而经过强力变形加工的钨丝会表现出显著的塑性。

钨基合金的种类

非合金化钨。非合金化钨的轧制件的化学成分要求需符合ASTM B760的规定。非合金化压制P/M钨的力学性能在很大程度上取决于其形变历程、纯度和试验取向(钨薄板、圆棒和线材实质上都是无方向性的)。

以非合金化钨制成的线材可以编织成网格，作为电阻加热元件用于高温真空炉(3000℃或5430℉)里。同样的，钨薄板可以在高温炉里作为遮热板使用，薄板和箔材都可以在医用X射线设备作为辐射的屏蔽使用。非合金化钨的其他应用包括用于在电子工业中光蚀刻的箔筛、熔炼液态金属的坩埚以及在气相沉积系统里的溅射靶(高纯度钨)。

掺杂钨。它含有微量铝(15ppm)、钾(90ppm)和硅(50ppm)，即一般所谓的AKS掺杂钨。掺杂钨的主要用途是灯泡的灯丝。

固溶型合金。它们含有不同数量的钼(2%~20%)或铼(1%~25%)。钨-钼合金之所以为人关注，是因为钼有助于细化电弧铸造钨的晶粒尺寸。它们的密度也小于非合金化钨，这有利于航天上的应用。此外，钼还降低钨的熔点，因此更容易借助熔化工艺生产材料。钨钼合金目前的一种用途就是在腐蚀环境中运行的转动主轴。尽管其他材料也能满足其耐腐蚀的要求，但是钨基合金还能提供超耐磨损性。

钨-铼合金的极大价值就在于通过铼的加入而获得的塑性效应。钨-铼合金的强度也超过非合金化钨，而且它们有较低的DBTT和较高的再结晶温度(铼是已知的惟一能降低钨的DBTT温度的合金元素)。钨-铼合金的用途包括高温热电偶元件、推进系统元件和X射线管的旋转阳极(铼的加入提高其抗热震和热疲劳的能力)。

弥散强化钨合金。它们代表了一类独特的材料。当温度超过2000℃(3630℉)时，其强度超过其他金属。这种材料含有1%~2%的氧化钍(ThO_2)或碳化铪(HfC)的弥散析出物，还可以包括加入铼的固溶。研究最多的合金系统有W-ThO_2(“加氧化钍”钨)、W-Re-HfC以及W-Re-ThO_2。

氧化钍弥散析出能增强热离子电子的发射，由此又改善钨极气体保护弧焊电极的启动特性。用氧化铈(W-2CeO_2)、氧化锆(W-0.25ZrO_2)和氧化镧(W-1$La2O_3$)合金化的钨也可以作为弧焊电极材料。氧化钍还能提高电子放电管的效率，并使钨丝在达到绝对熔点一半以上的温度时的蠕变强度。加氧化钍的钨也应用于高温航天元件上。

在所有钨合金中，作为W-Re-HfC系统的合金其强度最高。目前W-Re-HfC系合金正处于开发的前期阶段，并正在为多种应用进行评估，包括用于铸造镍基超合金的燃气轮机叶片的增强纤维(提高其耐高温的能力)和作为航天领域里的动力系统的结构材料。

钨重合金。它由钨-镍-铜或钨-镍-铁构成，应用于开发高密度材料的一些用途上。钨重合金主要用于砝码和配重、辐射屏蔽、散热片和电接触以及反装甲动能穿甲弹头。有关这种合金更详细的内容可参阅本手册“特种用途材料”一章。

铌及其合金

铌过去称为钶，其熔化温度为2468℃(4474℉)。它是一种具有韧性和塑性的银灰色金属，并具有独特的物理和力学性能的组合。在五种主要的高熔点金属中，它的熔点、密度(8.57 g/cm^3)和室温下弹性模量(103GPa或14.9×10^6psi)都是最低的，而线膨胀系数(7.3μm/m·K)最大。铌在种类繁多的各种腐蚀性介质包括除氢氟酸以外的大多数有机酸和无机酸中，都是极其稳定的。

现在铌作为合金元素在钢、超合金和非铁合金中的使用占其产量的约95%，铌及铌基合金的消耗占其余的5%。按高熔点金属的生产量，铌在钼和钨之后排列第三。

加工。其普通合金的加工，一般采用高温挤制或在接近合金的再结晶温度即通常为1095~1370℃(2000~2500℉)下的锻造。二次加工是利用温锻和冷锻经过在真空中进行再结晶退火的适当次数停顿而最后成形的。大多数的合金都具有足够的塑性，以加工成如薄板、箔材、圆棒、线材和管材的各种轧

制件。

铌基合金的种类。如表 3.12-1 所示，所有的铌合金都是固溶强化合金。最常用的合金添加元素为锆、钛、铪、钽和钨。

合金 C-103(Nb-10Hf-1Ti-0.7Zr)广泛应用于火箭零件上，它要求在 1095～1370℃(2000～2500℉)的温度中具有中等强度。合金 Nb-1Zr 能用于核用途，因为它有低的热中子吸收横截面、良好的耐腐蚀性和良好的耐辐射破坏。它广泛用于在 980～1205℃(1800～2200℉)的温度下处置液态金属系统。Nb-1Zr 能耐高温和高压下的钠蒸汽侵蚀。所以，它在高速公路照明中用于制造钠汽灯的零件。一种经改进的 Nb-1Zr 合金含有 0.1% C(如表 3.12-1 所列的 PWC-11)，应用于空间核动力系统中的液态碱金属的容器。

合金 C-129Y(Nb-10W-10Hf-0.1Y)、FS-85(Nb-28Ta-11W-0.8Zr)和 Cb-752(Nb-10W-2.5Zr)具有比 C-103更高的高温抗拉强度和蠕变强度，还能保持良好的加工性、涂覆性和热稳定性。它们用于机翼前缘、高超音速飞行器上的前锥体、火箭喷嘴、燃气轮机以及重返大气层飞行器的导向机构。

用于开发超导磁体的铌合金包括 Nb-46.5Ti 和 Nb_3Sn。还有一种 Nb-55Ti 合金可用于航天结构上的紧固件。

钽及其合金

钽具有许多其他高熔点金属所没有的性能组合。它的高熔点(2296℃或 5425℉)、间隙元素的容量和合理的弹性模量使之成为一种诱人的合金基材料。钽还具有极佳的室温塑性(>20%的伸长率)，容易焊接并且在焊接和非焊接条件下都有非常低的 DBTT(大约 25K 或 -250℃)以及呈现相对其他高熔点和活性金属都较高的固溶度。

钽的单一最大用途就是作为粉末和电子电容器的阳极，相当于其约 50% 的总消耗量。钽作为合金元素用于超合金，而且碳化钽还是硬质合金的重要组分。约 25% 的钽消耗量是构成轧制件。就高熔点金属的总消耗而言，钽排列在钼、钨和铌的后面。

加工。非合金化钽和钽合金的锭块可以利用锻造或挤压的方法进行开坯。电弧铸锭只能在镦粗或侧身锻打以后才能挤压。而粉末冶金烧结棒可以直接进行轧制而不需先行开坯。继之，钽可以用一般的冷变形加工技术如轧制、拉制、管材减径和模锻进行加工制造。在退火件之间的一般压缩量为 75%～80%，超过 95% 的压缩量就不太常见了。

钽基合金的种类。加入到钽里最为普通的合金元素是钨和铌(表 3.12-1)。有时也加入少量(1%～2%)的铪和/或铼。含有这四种元素的合金都要先进行固溶强化。然而，作为一种通过碳的加入而弥散的二次相强化的合金具有优良的抗蠕变和高温耐屈服的性能。这些合金中的一些(例如 Astar-811C)具有类似于钼和钨合金的抗蠕变性能(图 3.12-3)。为了增加晶粒尺寸，建议对碳化物强化合金采用高温退火处理，以此反而能提高其蠕变强度。

商业纯钽、钽-钨合金和钽-铌合金广泛地应用于化工设备中，如换热器、冷凝器、热电偶套管以及容器衬壁；最值得关注的是，它可用于硝酸、盐酸、硫酸和这些酸与许多其他化学物质组合物的冷凝、再沸腾、再加热以及冷却的过程。鉴于钽高昂的单位重量成本和高密度，可以利用经包覆、爆炸包覆或电阻焊的包钽复合钢产品，并将其应用于化工设备，从而提高这种材料的成本效率。又由于高熔点，钽可用于加热元件、热屏蔽和其他高温真空炉里的元器件，另外还发现其在修整砂轮上的某种用途。钽及其合金能用于航天和核的一些特种用途，而且在军事器件(例如穿甲武器系统)方面的应用也在不断增加。由于它具有对人体体液的耐腐蚀性，故能用于人体器官的装置和外科手术用钉。

铼及含铼合金

铼不同于其他高熔点金属，它具有一种 hcp 结构。铼的稀少性和高成本限制了它的应用。例如，在钨丝里加入 3% 的铼就会使其成本翻倍。尽管如此，铼的独特性能还是使其应用于一些重要且特殊的用途上。

铼的性能。因为铼没有 DBTT，故它能从零下到高温保持其塑性。铼还有非常高的弹性模量，在所有金属中，它仅次于铱和锇。当温度从室温升高到 725℃(1340℉)时，其模量将减小 20%(图 3.12-2)。这就意味着由铼制成的结构件将有极佳的机械稳定性和刚性，从而允许设计的零件有薄的截面。

与其他高熔点金属相比，铼能在一个很宽阔的温度范围里具有优良的抗拉强度和蠕变断裂强度(图 3.12-1)。在温度高达 2800℃(5070℉)且应力高时，铼的断裂寿命将超过钨。在高熔点金属中，铼的熔点(3180℃或 5755℉)仅次于钨。

铼的应用。铂-铼重整催化剂是铼的主要终端应用产品，并占有铼消耗的约 85%。铼作为合金元素用于钨-铼和钼-铼合金，使它们获得一种称之为“铼效应”的性能。铼的添加同时还可提高强度、可塑性和焊接性，并降低锻压产品的 DBTT 和减小再结晶脆化的可能性。通过在钨里加入(质量分数)10%～

26% Re 和在钼里加入(质量分数)11%~50% Re 就能得到性能上的最大提高。

铼也是超合金的固溶强化合金元素。许多经定向性凝固和单晶镍基的超合金含有高达3% Re。一种新近开发的单晶超合金(CMSX-10)含有 6% Re 和 0.25%~0.20% Mo、3.5%~7.5% W、7.0%~10.0% Ta 和 0.5% Nb。

抗氧化性和保护涂层

尽管其高熔化温度，高熔点金属还是要在适当温度的氧化气氛里发生反应，这就制约了它们作为高温材料的使用。例如在空气中，钽超过约 300℃(570℉)、铌超过 425℃(800℉)、钼和钨超过 500℃(930℉)和铼超过 600℃(1110℉)会发生氧化。在缺少保护性气氛的情况下，有两项措施可为其提供一定程度的耐氧化性：①通过将合金元素加入基体金属，用以改变和改善其氧化物相而形成一种较致密、更为粘着的氧化膜；②提供一种保护性涂层，以此抑制氧气的侵蚀。两种措施中使用涂层可获得更好的效果。涂层属于金属间化合物，包括能形成致密或玻璃状氧化层的硅化物和铝化物、能形成致密氧化层的合金、耐氧化的贵重金属以及一种用以作为防止氧穿透的物理屏障的稳定氧化物。

虽然涂层系统的开发可适用于所有的高熔点金属及它们的合金，但是大部分的研究都是针对用于航天元器件密度较低的铌合金。铌及其合金是仅有的能用于大型零件涂层的高熔点金属，以此防止在高温使用中发生氧化。早期用于铌涂层的开发都集中于紧密型烧结和 CVD。然而，这两种方法的经验表明，它们会提高金属的 DBTT 并造成零件扭曲。后来，由于阿波罗太空项目需要的推动，而发明了使用复合铝化物和硅化物的砂浆涂层技术。当制备和使用都合适时，这种涂层是可靠的且表现出极好的循环性能特征，且其力学性能不会发生急剧的下降，而且造成的硬件变形也微乎其微。

如今主要使用的涂层 Si-20Cr-20Fe 是利用悬浮于硝基清漆中的基础粉末与热熔胶凝剂制成的。普通的基体(材料)包括 Cb-752、C-129Y 和 FS-85。别种变型还含有使最后涂层具有较高熔化温度的硅化铪。使用这种砂浆涂层的方法包括浸渍、喷涂和修补涂刷。单面厚度约为 0.08mm(0.003in)的砂浆用过之后，将涂层加热到约 1300~1400℃(2370~2550℉)，使其发生粘结和弥散作用。硅化物涂层使铌能在高达 1650℃(3000℉)的温度中使用。

借助于砂浆涂层技术，使高温耐氧化性的提高也免不了产生副作用。与基体金属相比，经涂层的金属有较低的强度和塑性、较高的反射率以及重量的增加。由涂层的存在而造成的较为严重的局限性，就是设计和制造的选项减少。为了航天用途，由于涂覆的要求，必须去除锐棱。经涂层的硬件加工中，不推荐采用点焊和铆接。

其他用于提高耐氧化性的涂层工艺包括热喷涂和各种金属的包覆工艺(例如弥散粘结、锻造、挤压和轧制)。用于铌的涂层系统及其工艺如表 3.12-2 所示。

表 3.12-2　用于铌的耐氧化涂层系统

系统原理	成　分	工　艺
硅化物涂层		
硅化物	Si	化学气相沉积
二硅化钼	Si + Mo	MoO_3还原和化学气相沉积
液态相-固态基体	Se, Sn, Al	用 Sn-Al 包埋渗或 CVD-浸渍的疏松硅化物
嵌入玻璃的硅化物	Si + 玻璃	硅化物固体粉末包埋渗或 CVD + 玻璃涂刷
多层的	Mo, Ti + Si 和玻璃	用 Mo + Ti 粉末料浆烧结，包埋渗硅化物，玻璃料浆嵌入
多层复合硅化物	40Mo-10Si, 10CrB-10Al	等离子喷射-弥散
复合硅化物	Si-20Fe-20Cr	熔化硅化物
	Si-20Cr-5Ti	共晶混合物的熔化
	Si + (Cr,Ti,V,Al,Mo,W,B,Fe,Mn)	
	V-Cr-Ti-Si	真空和高压包埋渗
	Mo-Cr-Ti-Si, V-Cr-Ti-Si, V-Al-Cr-Ti-Si, Mo-Cr-Si	多次真空包埋渗

（续）

系统原理	成分	工艺
多层复合硅化物	Cr，Ti，Si	真空包埋渗和真空涂料包埋渗，熔化料浆和包埋渗，硫化床，电泳，化学气相沉积，电解熔化盐
改性硅化物	Si，V，Cr，Ti	硫化床
	Si	碘固体粉末包埋渗
	Si-B-Cr	多次固体粉末包埋渗
	Si-Cr-Al	多次固体粉末包埋渗
	Si＋添加剂	一次固体粉末包埋渗
	Si＋Cr，Al，B	一次固体粉末包埋渗
	Si＋添加剂	固体粉末包埋渗，硫化床，熔化盐，料浆浸渍
	Si＋添加剂	一次固体粉末包埋渗
	Si＋添加剂	固体粉末包埋渗
铝化物涂层		
铝化物	Al＋添加剂	熔化料浆
简单铝化物	Al	固体粉末包埋渗
多层系统	Fe，Cr，Al，Ni，Mo，Si，VSi_2，$TiCr_2$，$CrSi_2$，B＋Al	粉末冶金和铝热浸渍
	Cr，FeB，NiB，Si，Al_2O_3，SiO_2，ThO_2＋Al	在Ni＋Al热浸渍中电镀弥散
	Al_2O_3＋Ti＋Al	（Al_2O_3＋TiH），喷射-烧结＋Al热浸渍
氧化物-金属复合物	Al_2O_3＋Al	Al_2O_3-Al混合物的料浆熔化
改性铝化物	Al＋B	固体粉末包埋渗
	88Al-10Cr-2Si	熔化料浆
	Al-Si-Cr	熔化料浆
	Al-Si-Cr，Ag-Si-Al	热浸渍
	Al＋(Si,Ag,Cr)	镀银＋Al，Cr，Si热浸渍
	Al＋Sn	热浸渍
锌涂层		
自修复金属间化合的	ZnZn＋Al，Ti，Co，Cu，Cr，Fe，Zr，Si	真空蒸馏和热浸渍
氧化物涂层		
嵌入玻璃的氧化物	Al_2O_3＋玻璃(氧化钡,氧化铝,氧化硅)	火焰喷射Al_2O_3＋玻璃料浆
镍-铬涂层		
耐氧化合金	Ni-Cr	火焰喷涂，爆燃喷雾，等离子电弧
碳化铬涂层		
碳化物	Cr-C	等离子喷涂
贵重金属涂层		
包覆	Pt，Rh	轧制粘结和气密接封
隔离-分层-包覆	Pt，Rh＋Re，Be，Al_2O_3，W，ZrO_2，MgO，SiC，Hf	贵重金属包覆隔离层
纯金属	Ir	熔化盐沉积

参考文献

[1] Datasheet: Typical Properties of Refractory Metals and Their Alloys, *Mater. Process.*, Vol 142 (No. 3), Sept 1992, p 54.

精选参考文献

- B.D. Bryskin, Rhenium and Its Alloys, *Adv. Mater. Process.*, Vol 142 (No. 3), Sept 1992, p 22–27.
- R.W. Buckman, Jr., Alloying of Refractory Metals, *Alloying*, J.L. Walter, M.R. Jackson, and C.T. Sims, Ed., ASM International, 1988, p 419–445.
- S.M. Cardonne, P. Kumar, C.A. Michaluk, and H.D. Schwartz, Tantalum and Its Alloys, *Adv. Mater. Process.*, Vol 142 (No. 3), Sept 1992, p 16–20.
- F.J. Clauss, Refractory Metals and Their Alloys, *Engineer's Guide to High-Temperature Materials*, Addison-Wesley, 1969, p 176–217.
- N.C. Dalder, T. Grobstein, and C.S. Olsen., Ed., *Evolution of Refractory Metals and Alloys*, TMS-AIME, 1994.
- J.B. Lambert et al., Refractory Metals and Alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Alloys*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 557–585.
- I. Machlin, R.T. Begley, and E.D. Weisert, Ed., *Refractory Metal Alloys: Metallurgy and Technology*, Plenum Press, 1968.
- Refractory Metals and Alloys, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p 361–382.
- M. Schussler and C. Pokross, Corrosion of Tantalum, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 725–739.
- J.A. Shields, Jr., Surface Engineering of Refractory Metals and Alloys, *Surface Engineering*, Vol 5, *ASM Handbook*, ASM International, 1994, p 856–863.
- J.A. Shields, Jr., Molybdenum and Its Alloys, *Adv. Mater. Process.*, Vol 142 (No. 4), Oct 1992, p 28–36.
- J.J. Stephens and I. Ahmad, Ed., *High Temperature Niobium Alloys*, TMS-AIME, 1992.
- R.H. Titran, Niobium and Its Alloys, *Adv. Mater. Process.*, Vol 142 (No. 5), Nov 1992, p 34–41.
- J.P. Wittenaurer, T.G. Nieh, and J. Wadsworth, Tungsten and Its Alloys, *Adv. Mater. Process.*, Vol 142 (No. 3), Sept 1992, p 28–37.
- T.-L. Yau and R.T. Webster, Corrosion of Niobium and Niobium Alloys, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 722–724.
- S.Y.H. Yih and C.T. Wang, *Tungsten: Sources, Metallurgy, Properties and Applications*, Plenum Publishing, 1979.

第 13 章　硬质合金和金属陶瓷

本章的内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》第 2 卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，950 ~ 977 页；《ASM 手册》第 18 卷摩擦、润滑和磨损技术 1992，795 ~ 800 页。其他有关内容可以查阅本章末所列的参考文献。

硬质合金属于一种硬且耐磨的高熔点材料，它们利用可塑性的金属粘合剂（通常为钴，但有时用镍以提高其耐腐蚀和耐氧化性）将硬的碳化物颗粒粘结或烧结在一起。这种材料是在 20 世纪 20 年代在德国首先开发的，当时是为了找到一种用于拉制白炽灯的钨丝所需要的具有足够耐磨性的模具材料，以此代替当时所用的昂贵金刚石。最早生产的硬质合金（WC-Co）是用钴粘合剂的碳化钨（WC）。虽然烧结碳化物（cemented carbide）一词在美国广泛使用，但在国际上，这种材料还是更多地称为硬质合金。

多年以后，这种基本的 WC-Co 材料经过改进生产出含有碳化钨、碳化钛和钴（WC-TiC-Co），以及更为复杂的碳化钛、碳化钽和碳化铌及其他固溶立方碳化物（WC-TiC-(Ta, Nb) C-Co）的各种硬质合金。镍也可以作为粘合剂材料使用，以提高其耐腐蚀性，尽管其使用（不到总产量的 10%）大大少于用钴的碳化物。此外，碳化铬（Cr_3C_2）也可加入 WC-Co 和 WC-Ni 的牌号中，进一步提高其耐腐蚀性和耐氧化性。非合金化或纯净牌号（WC-Co）和较高合金复杂牌号都得到广泛的不同应用，包括金属切削、采矿、建筑、钻岩、金属成形、结构零件和耐磨零件。

金属陶瓷一词指的是一种陶瓷材料与金属粘合剂的复合物。如刀具行业里的文献所定义的，陶瓷相包括钛、钼、钨、钽、铌、钒、铝及它们的固溶体的碳化物、氮化物和碳氮化物。而金属粘合剂相由镍、钴和钼，或其组合。按此定义，以下材料都纳入金属陶瓷一类里。

- WC-Co；
- WC-TiC-Co；
- WC-TiC/TaC/NbC-Co；
- Ti-Ni；
- Ti（C，N）-Ni/Mo（碳氮化钛 + 镍和钼）。

然而，刀具行业认为只有 TiC-和 Ti（C，N）基的材料才是金属陶瓷，而 WC 基材料都称之为硬质合金。

就非切削方面的应用而言，金属陶瓷的定义要广义得多，它包括碳化物-、碳氮化物-、氮化物-、氧化物-和硼化物基金属陶瓷。尽管事实是许多金属陶瓷系统都已经过研究，但是只有用于成形模具和其他耐磨元件的钢结 TiC（国内称钢结硬质合金——译者注）才在非切削应用方面取得商业上的成功。

硬质合金的制造

所有的硬质合金元件都是用粉末冶金（P/M）工艺制造的。如下所述，重要的步骤包括粉末的加工、牌号（硬质合金）粉末的生产、粉末的压实、烧结和精加工。

粉末的加工。碳化钨是通过氧化钨的还原并接着在 1400 ~ 1500℃（2550 ~ 2730℉）的温度中进行碳化。颗粒的大小为 0.5 ~ 3.0μm。

钴是通过氧化钴的还原或从有机盐——特别是草酸钴——里获得的。钴粘合剂相在与 WC 的研磨和随后的液相烧结工序的过程中会发生明显的改变。

TiC/TaC/NbC 粉末都是用钛、钽和铌的金属氧化物生产得到的。这些氧化物与金属钨粉和碳相混合，类似于 WC 粉末的制备。然后将混料在氢气氛或真空中加热使氧化物还原并生成固溶碳化物。溶媒法（Menstruum process）也是生产这种混合碳化物的有效方法。

牌号粉末的生产。硬质合金牌号粉末是用 WC 与钴或镍粘合剂并按照用途以不同的 TaC/TiC/NbC 数量进行组合、生产而成。牌号粉末是用传统的球磨机、碾磨机或震动磨机进行碾磨。碾磨的过程就是减小原料颗粒的大小并且能获得均匀一致的混料。碾磨的操作一般都是在保护性的溶剂里进行的，以此产生的热量以致对粉末的氧化作用降到最小，而且还使粉末颗粒弥散以此获得紧密的混合。在牌号粉末的制造过程中，还要加入 2%~3%（质量分数）的固体润滑剂如固体石蜡。这种润滑剂能降低发生氧化的可能性，并使压实坯件达到烧结前的强度要求。润滑剂/溶剂/粉末构成的料浆然后进行干燥以去除溶剂。喷雾干燥是使用最广的粉末干燥方法。料浆通过一个喷嘴进行雾化，并喷入一股氮气流中。让溶剂蒸发掉，压实在

容器的外部待回用。经干燥的粉末则成为能自由流动的球状颗粒料，直径为 150～250μm。

粉末压实。这个过程包括若干迥异的技术。许多耐磨器件都是在 50～150MPa(7～22ksi)的压力下通过自动或半自动的压制进行生产的。在冷静等压过程中，牌号粉末利用全方向的相等压力压实成为粗坯或坯料。然后这种粗坯通过预成形或切削加工达到所要求的净形状。碳化物牌号粉末可以用挤压方法生产截面小且不变的长形元件。现在还有限地使用模具注塑方法生产硬质合金。

烧结工艺。这是在真空、氢气或惰性的气氛中采用批量型的或半连续型的炉子进行生产的。保持 400～500℃(750～930℉)的温度使零件脱蜡，所蒸发的润滑剂在加热室的外部冷凝并予以去除。最后的烧结是在 1300～1600℃(2370～2910℉)的温度下进行，其精确温度取决于钴的含量——较高钴含量的牌号需要较低的烧结温度。最后的烧结温度应在碳化物-粘合剂系统的共晶温度以上，使粘合剂部分熔化。钴对于 WC 的极佳润湿性能导致快速液相烧结，由此促使 WC 颗粒的聚结并形成充分的致密，最终形成无空隙的显微组织。所产生的线收缩率范围为 15%～25%。

20 世纪 70 年代初期以来，热等静压压制(HIP)的优点就被发掘出来。要求高可靠和/或表面完整性的器件应采用 HIP 来消除残余空隙、凹点和飞刺。将材料加热至液相线以上，通过一种惰性气体将容器加压到略低于 100MPa(15ksi)。在温度和压力的联合作用下，迫使粘合剂进入所有残留的空隙和凹点。目前的先进技术是将液相烧结与 HIP 结合成为一个单一的烧结-HIP 工序。烧结-HIP 使用比常规 HIP 使用较低的压力和较高的温度，而不必牺牲器件的可靠性。这样形成的烧结-HIP 显微组织比用常规 HIP 所生产的更加均匀一致，并且烧结-HIP 也更具成本有效性。

精加工。包括金刚石砂轮的磨削、使用线切割或成型电极的电火花加工以及使用各种研磨技术的刃磨。使用含有金刚砂的研磨浆或膏进行精研，最终可以达到镜面的表面粗糙度。

用于切削加工的硬质合金

硬质合金作为切削刀具的使用性能介于工具钢与金属陶瓷之间。与工具钢相比，硬质合金更硬也更耐磨，却也表现了比工具钢较低的抗断裂性和导热性。另一方面，金属陶瓷比硬质合金更加耐磨，而韧性却不足。无论硬质合金还是金属陶瓷它们的性能都强烈地取决于成分和显微组织，而且硬质合金工具的性质不仅取决于碳化物的种类和数量，还取决于碳化物晶粒的尺寸和粘合剂金属的数量，(见下面“组织/性质的相互关系”的有关讨论)。

碳化钨-钴合金。最早可商用的硬质合金是由用钴粘结起来的 WC 颗粒所构成的。这些就是通常所谓的纯牌号。这些合金展现了优异的简单磨料磨损耐磨性，所以在金属切削方面有许多应用。表 3.13-1 列出了若干中纯 WC-Co 合金的具有代表性的性能。

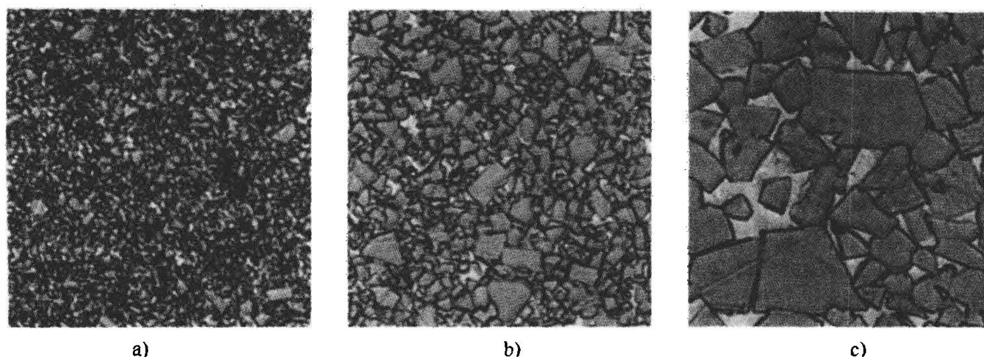
表 3.13-1　有代表性的钴粘结的硬质合金的性能

常规成分	晶粒尺寸	硬度 HRA	密度		横向强度②		抗压强度		弹性模量		相对耐磨性①	线膨胀系数/(μm·K)		热导率/[W/(m·K)]
			g/cm^3	oz/in^3	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi		当200℃(390℉)	当1000℃(1830℉)	
97WC-3Co	中	92.5～93.2	15.3	8.85	1590	230	5860	850	641	93	100	4.0	—	121
97WC-6Co	细	92.5～93.1	15.0	8.67	1790	260	5930	860	614	89	100	4.3	5.9	—
	中	91.7～92.2	15.0	8.67	2000	290	5450	790	648	94	58	4.3	5.4	100
	粗	90.5～91.5	15.0	8.67	2210	320	5170	750	641	93	25	4.3	5.6	121
90WC-10Co	细	90.7～91.3	14.6	8.44	3100	450	5170	750	620	90	22	—	—	—
	粗	87.4～88.2	14.5	8.38	2760	400	4000	580	552	80	7	5.2	—	112
84WC-16Co	细	89	13.9	8.04	3380	490	4070	590	524	76	5	—	—	—
	粗	86.0～87.5	13.9	8.04	2900	420	3860	560	524	76	5	5.8	7.0	88
75WC-25Co	中	83～85	13.0	7.52	2550	370	3100	450	483	70	3	6.3	—	71
71WC-12.5TiC-12TaC-4.5Co	中	92.1～92.8	12.0	6.94	1380	200	5790	840	565	82	11	5.2	6.5	35
72WC-8TiC-11.5TaC-8.5Co	中	90.7～91.5	12.6	7.29	1720	250	5170	750	558	81	13	5.8	6.8	50

①按最为耐磨料磨损材料的数值设计为 100。　②指抗弯、弯曲和挠曲强度——译者注。

一些商用价值明显的合金含有钴的范围(质量分数)从3%~25%。用于切削加工的合金(质量分数)3%~12% Co 和碳化物晶粒尺寸从0.5~大于5μm都是常用的。

理想的WC-Co合金显微组织应当仅显示两种相：多角形的WC晶粒和钴粘合剂相。几种纯WC-Co合金的典型显微组织如图3.13-1所示。其含碳量必须控制在很小的范围里。太高的含碳量会造成游离、细小分开的石墨(C-型疏松)的存在，其少量的存在不会对切削应用产生有任何负面影响。然而碳的缺少将会导致一系列的双碳化物(例如 Co_3W_3C 或 Co_6W_6C)一般所谓的η相的形成，它们会带严重的脆性。



a)　b)　c)

图3.13-1　硬质合金90WC-Co(纯牌号)的显微组织。亮的组分是钴粘合剂

a) 细晶粒大小　b) 中等晶粒大小　c) 粗晶粒大小。全部1500×

亚微米级的碳化钨-钴合金。近年来，已经开发出有亚微米级大小碳化物晶粒的WC-Co合金，适用于要求更具韧性和刃口强度的用途。其典型的用途包括可转位的嵌入式刀头和种类繁多的固体碳化物钻削和铣削刀具。这些合金中通过加入少量(质量分数为0.25%~3.0%)的TaC、NbC、VC或CrC，使晶粒细化。其加入是在钨的碳化之前或粉末调和的后期。

含有碳化钨、碳化钛和钴的合金。在20世纪20年代早期开发的WC-Co合金，成功地应用于铸铁和非铁合金的切削加工上，其切削速度大大高于高速钢刀具所能达到的速度，但是在用于切削钢时，会遭受化学腐蚀或弥散型磨损。故当其切削速度尚未超过用高速钢时的速度很多时，就很快损坏了。由此促使WC-TiC-Co合金的开发。

碳化钨易于弥散进入钢屑表面，但是WC和TiC的固溶体能耐这种类型的化学侵蚀。遗憾的是，TiC和WC-TiC固溶体比WC更脆且较不耐磨料磨损。因此要使加入WC-Co合金里的TiC的数量保持在最低限度，一般来说不得大于15%(质量分数)。碳含量在WC-TiC-Co合金中的作用不如在WC-Co中那么重要，而且在显微组织中并不出现η相，除非碳非常不充分。此外，在这些合金中游离石墨很少出现。

复合牌号。WC-TiC-Co合金已经让位于WC、钴、TiC、TaC和NbC的合金。含有TiC、TaC和NbC的WC-Co合金称为复合牌号、多牌号或钢切削牌号。在WC-TiC-Co合金中加入TaC，可以部分地克服TiC对于WC-Co合金强度的不利影响。碳化钽还能防止凹坑的形成和提高耐热震性。耐热震性对于涉及断续切削的用途特别有用。碳化钽常常作为(Ta、Nb)C加入，由于TaC和NbC之间的化学相似性，故将它们分离的代价昂贵。所幸的是在大多数的情况里NbC具有一种类似于TaC的影响。与WC-Co合金不同，WC-TiC-(Ta、Nb)C-Co的显微组织显示了三种相：多角形的WC晶粒、圆形的WC-TiC-(Ta、Nb)C固溶体晶粒和钴粘合剂(图3.13-2)。相的大小和分布的差

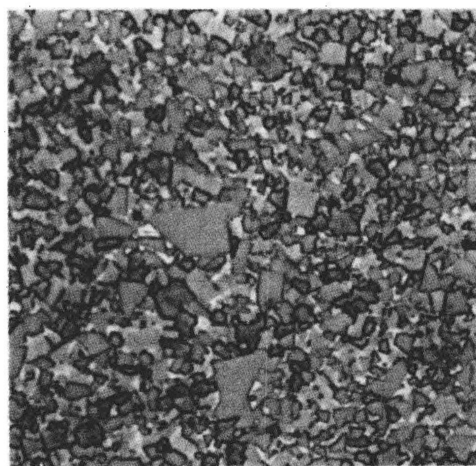


图3.13-2　85QWC-9(Ta、Ti、Nb)C-6Co的钢切削牌号硬质合金的显微组织，中等晶粒大小。灰色带角度颗粒是WC，深灰色的圆形颗粒为固溶体碳化物。白色区域为钴粘合

异程度很大，取决于所用原材料的数量和晶粒尺寸及其制造方法。相似地，针对有代表性的钢切削牌号，这些复合合金的性能也是千差万别，如表3.13-1所示。

硬质合金的分类

对于硬质合金的分类尚没有可普遍接受的系统。下面讨论由生产厂家和用户最常用的系统。

C-牌号系统。美国碳化物工业采用一种以用途为依据的分类系统，以此有助于硬质合金牌号的适当选择。这种C-牌号系统并不要求使用商用名称来鉴别特定的碳化物牌号(表3.13-2)。虽然这种分类简化了工具的应用，但是它们没有反映能足以影响碳化物合适选择的材料性能。此外，包含在这个分类方案里的加工材料的定义也不够确切。对用于描述不同应用种类的名词术语，也没有达成完全一致的意见。尽管有这些局限性，但是从1942年以来C-牌号的分类方法还是一直成功地为制造工业所利用。

ISO分类。1964年，国际标准化组织颁布了ISO推荐技术标准R513《碳化物在切除切屑的切削加工上的应用(Application of Carbides for Machining by Chip Removal)》。碳化物的ISO分类法的要点如表3.13-3所示。

表3.13-2 硬质合金的C-牌号分类

C-牌号	应用类别
铸铁、非铁以及非金属材料的切削	
C-1	粗切削加工
C-2	一般用途的切削加工
C-3	精切削加工
C-4	精密切削加工
碳钢和合金钢的切削	
C-5	粗切削加工
C-6	一般用途的切削加工
C-7	精切削加工
C-8	精密切削加工
非切削应用	
C-9	磨损表面，无振
C-10	磨损表面，轻振
C-11	磨损表面，重振
C-12	轻度冲击
C-13	中度冲击
C-14	重度冲击

表3.13-3 按ISO R513分类的切削加工使用的碳化物

代号①	应用种类	
	可切削材料	应用和工作条件
P01	钢、钢铸件	精车和镗孔、高速切削、小切屑截面、高精度和低表面粗糙度、无振动切削
P10	钢、钢铸件	车削、仿形切削、螺纹切削、铣削、高速切削、小或中切屑截面
P20	钢、钢铸件、长切屑的可锻铸铁	车削、仿形切削、铣削、中速切削、中切屑截面、小切屑截面的刨削
P30	钢、钢铸件、长切屑的可锻铸铁	车削、铣削、刨削、中或低速切削、中或大切屑截面、在不利条件下的切削②
P40	钢、有夹砂和气孔的钢铸件	车削、刨削、开槽、低速切削、在不利条件下的大切屑截面并有大切削角进行切削的可能性②，还能在自动机床上使用
P50	钢、中低抗拉强度的钢铸件，里面有夹砂和气孔	要求使用非常高韧性碳化物的用途上，车削、刨削、开槽、低速切削、在不利条件下的大切屑截面并有大切削角进行切削的可能性②，还能在自动机床上使用
M10	钢、钢铸件、锰钢、灰铸铁、合金铸铁	车削、中或高速切削、小或中切屑截面
M20	钢、钢铸件、奥氏体或锰钢、灰铸铁	车削、铣削、中速切削、中切屑截面
M30	钢、钢铸件、奥氏体钢、灰铸铁、耐高温合金	车削、铣削、刨削、中速切削、中或大切屑截面

（续）

代　　号①	应用种类	
	可切削材料	应用和工作条件
M40	低碳易切削钢、低拉伸钢、非铁金属和轻合金	车削、切断、特别用于自动机床
K01	非常硬的灰铸铁、回跳硬度>85 的冷硬铸铁、高硅铝合金、淬硬钢、高耐磨塑料、硬纸板、陶瓷	车削、精车、镗削、铣削、刮削
K10	硬度>220HB 的灰铸铁，短切屑的可锻铸铁、淬硬钢、硅铝合金、铜合金、塑料、玻璃、硬橡胶、硬纸板瓷器、石头	车削、铣削、钻削、镗削、拉削、刮削
K20	硬度达 200HB 的灰铸铁、非铁金属、铜、黄铜、铝	车削、铣削、刨削、镗削、拉削、要求使用非常高韧性碳化物的用途上
K30	低硬度灰铸铁、低拉伸钢、压制木材	车削、铣削、刨削、开槽、在不利条件②下并有大切削角进行切削的可能性
K40	软木或硬木、非铁金属	车削、铣削、刨削、开槽、在不利条件②下并有大切削角进行切削的可能性

①在各个字母类别中，小代号的数字用于高速和小进给，大代号数字用于较低速和/或较大的进给。代号数字的增加也意味着硬质合金韧性的提高和耐磨性的降低。　②不利条件包括难以加工的形状、有铸造或锻造外皮的材料、硬度不均匀的材料、深度有变化的切削、断续切削以及中到严重的震动。

在 ISO 系统里，所有的切削牌号分为三种色码的组别：

- 高合金的 WC 牌号（字母 P，蓝色）适合切削钢；
- 合金 WC 牌号（字母 M，黄色，一般 TiC 含量低于相应的 P 系列）适合多种用途，如钢、镍基超合金和球墨铸铁；
- 纯 WC 牌号（字母 K，红色）适合切削灰铸铁、非铁合金和非金属材料。

一组中的每一种牌号都设有一数字，用以代表其在从最高硬度至最大韧性之间的位置。P-牌号在01～50 之间确定，K-牌号在 10～50 之间确定。用多少有点规则的数值区间表述其典型用途。

硬质合金的性能

组织/性能之间的关系。硬质合金各个牌号的特定性能并不仅仅取决于碳化物的成分，还取决于其晶粒尺寸和粘合剂的数量和种类。

九种纯牌号和两种复合的钴粘合剂的成分和性能如表 3.13-1 所示。由于性能是受成分和组织的影响，所以为定义特定牌号必须对其成分和组织两种特征进行规定。

对于 WC 晶粒尺寸相类似的纯 WC，增加钴的含量可以提高其横向强度（指抗弯、弯曲和挠曲强度——译者注）和韧性，但是硬度、抗压强度、弹性模量和耐磨性会因此降低。例如，如果将尺寸中等、分别含有 3%、7% 和 25% Co 的碳化物进行比较，可以发现 3% Co 牌号的硬度和耐磨性最高——这种性能使之适用于拉丝模和切削铸铁和其他磨损或粘性材料的刀具。6% Co 牌号的所有性能都具有中等数值，是一种适合一般用途的碳化物好材料。而 25% Co 牌号具有最大的韧性，应用于有重度冲击性的用途。由于其相对较低的硬度和耐磨性，它不能用于切削刀具。与之相类似的性能和应用分析，还能用于含有 6%、10% 和 16% Co 的细晶粒和粗晶粒的牌号。

对于含有 6% Co 的牌号还能进行另一组的比较。所有三种牌号——细、中和粗——都应用于切削刀

具，但是它们所适合的用途涉及不同的切削条件和不同的加工材料。细晶粒材料用于球墨铸铁、灰铸铁和冷硬铸铁以及奥氏体不锈钢、高温合金和非金属材料的从切削精加工到中粗加工的各种用途。中等粒度的晶粒材料用于这类相同锻压加工材料的从轻到重的切削加工；而粗晶粒用于这类材料的从重到极重的切削粗加工。中等粒度的材料广泛应用于一般用途的切削，是因为其性能在硬度和韧性之间获得一种良好的具体操作上的折中。粗晶粒牌号的硬度和耐磨性都是最低的，但其韧性是上述三种牌号中最高的，故广泛应用于同时需要有中等硬度和高韧性的用途里。含有10%~16% Co的牌号也可以进行类似的比较。一般来说，晶粒尺寸减小可提高其耐磨料磨损性，并且能较为容易地保持刀具的刃口，增加晶粒的大小能提高韧性，并使硬质合金更适合在模具上的应用。

对复合牌号进行类似于上面对纯牌号所作的比较是很不容易的。碳化物类型以及所含的粘合剂的差异影响其性能，由此又影响对于特定用途的适用程度。

表3.13-1所列的两种复合牌号含有近似相同的WC量，但是其中一种含有约两倍的粘合剂。较低钴牌号用于较轻负荷的切削，TiC含量高的复合牌号的横向强度相对较低，而耐磨料磨损和抗形成凹坑的能力相对较高。它广泛用于高速、轻载的精加工。钴和TaC含量最高的复合牌号尤其适合作为热作工具用于金属的切削和成形。

硬度。硬度一般都是用洛氏A单位测量，范围从高钴、粗颗粒牌号的83.0HRA至低钴、细颗粒的93.0HRA。在欧洲广泛使用的维氏金刚石棱锥硬度(HV)，使用30kg载荷，其硬度的数值范围为800~2000kg/mm^2。硬度的精密度和准确度受试件表面粗糙度、上表面与底面的平行度以及硬度标准块和金刚石压头的质量的显著影响。具有相类似晶粒尺寸的纯WC-Co牌号，硬度随粘合剂含量的增加而降低。

耐磨料磨损性。超耐磨料磨损性是在种类繁多的各种工业用途里选用硬质合金的一个主要理由。大多数的硬质合金生产厂家，都使用湿砂磨料磨损试验测试其耐磨料磨损性。在此试验中，试件靠在一个以固定转数旋转的转盘上，而且试件和转盘都浸没于含有氧化铝颗粒的水质砂浆中。以试验结果的比较顺序为其报告，通常以磨耗体积的倒数作为磨损评价的依据。虽然有标准试验步骤可循(如ASTM试验611)，但碳化物的生产厂家还没有就统一的试验方法取得一致意见，因此文献中所源引的耐磨料磨损性的数值差别很大。由于这种差别，几乎无法对不同的生产厂家所作的试验结果进行有效的比较。当硬质合金材料用于切削钢或其他材料时，将这种耐磨料磨损性作为硬质合金材料耐磨性的一种衡量几乎也是不合理的，在标准试验中的耐磨料磨损性并不能直接对应于实际切削过程中的耐磨性。

一般来说，硬质合金的耐磨料磨损性随钴含量或晶粒尺寸的增加而降低。复合碳化物的耐磨料磨损性低于含有同样钴含量的纯WC牌号。耐磨料磨损的比较数值如表3.13-1所示。

韧性。硬质合金是一种脆性材料，通常在拉伸试验中，它们只有不到0.2%的伸长率。

硬质合金的夏比冲击强度值意义不大，甚至会被误解。在非常硬的材料进行冲击试验的过程中，所吸收的能量主要由试件在弹性弯曲时吸收的能量和由试验机吸收的能量构成。作为材料韧性所测量的总吸收能量中的一部分，即为其塑性变形所做的功和形成一个新表面所必需消耗的能量仅占所测量到的总能量的百分之几。

断裂韧度(K_{Ic})值表示一种材料抗拒从内在发裂(指材料内部已存在小于临界长度尺寸的裂纹——译者注)处发生断裂的能力。由于采用不同的试验方法和试件几何形状，故当对不同生产厂家提供的试验数据进行比较时，必须予以注意。断裂韧度随钴含量或WC晶粒尺寸的增加而增加。

耐腐蚀性。耐腐蚀性一般不作为碳化物的要求来考虑，仅就耐腐蚀而言，工业上显然有不少很好的材料可供使用。而且当要求其具有耐腐蚀性、耐磨性、刚性、韧性和热导性相结合——如工业泵的旋转机械密封件——时，其材料就可以选择使用硬质合金。

碳化物的耐腐蚀性受制于钴粘合剂对化学侵蚀的敏感性，尽管WC也会受到一些介质(如硝酸和氢氯酸)的侵蚀。腐蚀性介质一般会将基体里的钴粘合剂溶解掉而留下脆弱、无以支承的WC晶粒骨架，从而很容易被磨去。纯WC-Co合金的耐腐蚀性一般与其粘合剂含量呈反比。用镍粘合剂代替钴确实能使耐腐蚀性和耐氧化性有一定的提高，但是缺少钴粘合剂所具有的润湿性；而且在粘合剂含量相同的条件下，镍粘结牌号的硬度和韧性相对钴粘结牌号有所下降。还有几种牌号在钴粘合剂中添加铬用于提高其耐腐蚀性。然而铬会促成碳-贫η相的形成，从而导致韧性和强度的降低。含铬、钼和其他元素的镍粘合剂牌号合金的成功开发，使得耐腐蚀性有显著的提高。

WC-Co硬质合金在温度高达650~700℃(1200~1290℉)的空气里都能有较好的耐氧化性。受影响最快的组分是WC，它将被氧化成为WO_3。在氧气中，温度的极限比较低，而在大约500℃(930℉)就会快速恶化。然而，即使在空气中，各种组成的WC-Co

不管多长时间，其实际温度极限是500~600℃(930~1110℉)。在WC-Co成分的基体里，添加TiC或TaC能提高一些耐氧化性。

经涂层的硬质合金

物理或化学气相沉积(PVD或CVD)。现在将它们用于大多数的金属切削刀头和一些磨损零件上。其涂层厚约5μm，并由TiC、TiN、Ti(C、N)、HfN、AlO、氧化铝或它们的组合(多层涂层)构成。它们的目的就是将在切削钢过程中发生的磨损降到最低限度，尤其要减少工件材料溶解进入切削刀具的情况发生，因为这会导致(刀具)月牙洼磨损。氮化钛涂层主要也是为了减小刀具/工件界面上的摩擦力。

CVD和PVD涂层的应用方法颇不相同。CVD涂层通常用于约1000℃(1830℉)的温度，因而由于在基体与涂层之间的不同线膨胀系数和弹性模量而产生较高的残余应力。这就造成涂层零件的横向断裂强度比未经涂层零件的明显降低(30%)。CVD涂层的残余拉应力也会在涂层中产生横向裂纹。而这些裂纹并不会影响涂层的粘附性，它们会在断续切削过程中引起刀具的断裂，在此过程中，切削刃口承受的是疲劳载荷。解决与涂层有关的刀具断裂问题的一个措施就是通过增加它的外围钴含量(钴增浓)来提高基体的断裂韧度。钴增浓表面区域的厚度为10~40μm，用以提高刃口强度，从而保持涂层的弥散耐磨性。图3.13-3所示是将多层涂层用于在复合牌号的硬质合金基体上钴增浓的一个例子。

PVD技术用低于500℃(930℉)来减小涂层里的应力，并将强度的损失降到最低限度。PVD技术的缺点就是这是一种不能进行绕涂的沉积技术。这就必须在PVD沉积过程中移动刀具的夹具，以此保证刀头的前面和后面上的涂层厚度均匀一致。

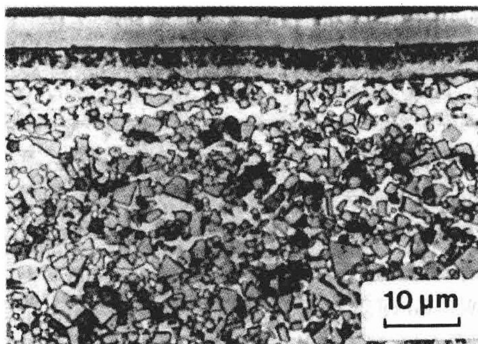


图3.13-3 钴增浓的86WC-8(Ti、Ta、Nb)-6Co基体上面的多层CVD涂层(TiC/Ti(C、Nb)/TiN)。注意基体表面所增加的钴含量(白色组分)。1500×

等离子辅助CVD涂层。等离子辅助CVD涂层工艺是介于CVD和PVD之间的一种折中技术，它结合了中等的沉积温度(~600℃或1110℉)和无需在涂层过程中旋转刀具就能达到厚度的均匀性。涂导电的涂层(TiN和TiC)和绝缘的涂层(Al_2O_3)都可以利用这种技术。

CVD/PVD涂层。这是在一种具有韧性的钴增浓基体上用外层部的PVD TiN层与内层的CVD TiN/Ti(C、N)的组合涂层，它是碳化物切削刀具涂层近来的发展，适用于如铣削一类断续切削的应用。其内部的CVD层提供给极佳的粘附性和耐磨性，而外部的PVD层提供一种硬、细晶粒、无裂纹、光滑并具有压缩残余应力的表面。

金刚石涂层。它是在有氢离子存在的情况下，通过含碳气体的分解而形成的低压合成金刚石薄膜，这是硬涂层技术中的最新发展。这种工艺改变了利用的整块金刚石的高压、高温合成方法制造多晶体金刚石(PCD)。金刚石涂层的碳化物用于切削铝-硅合金和非金属的复合材料。

硬质合金的非切削应用

目前差不多50%的硬质合金总产量用于非切削金属的用途，例如金属成形模、冲模和轧辊，运输和建设、采矿、油气钻探、森林工具以及流体处理元件。用于非切削用途的大多数硬质合金都是不涂层的纯WC-Co牌号。合金(复合)的牌号仅用于一些特殊用途上。典型的应用例子如表3.13-4所示。

金属陶瓷

切削牌号。用于切削用途的金属陶瓷有TiC和Ti(C、N)，并用镍或镍-钼为其粘合剂。Ti(C、N)金属陶瓷是用P/M方法进行制造的，包括液相烧结，与传统碳化物所用的方法相类似。与硬质合金一样，金属陶瓷的显微组织显示硬、耐磨的颗粒，它们镶嵌在塑性的粘合剂相里。虽然这些材料在室温和高温里的硬度可以与硬质合金相比，但是它们的密度、强度和韧性比起传统的硬质合金都有些低。其性能随粘合剂在整个成分中的比例而变化。一般，TiC和Ti(C、N)基金属陶瓷的耐腐蚀性优于WC基的碳化物。金属陶瓷的耐氧化性也明显超过硬质合金，而且能用于高达900℃(1650℉)的温度下。

作为金属陶瓷家族里最早的切削刀具，TiC-Ni合金早在20世纪30年代就已经商业化了，但是它也不能与本质上就比较强的WC-Co基刀具相竞争。直到1960年由于在TiC合金中加入钼，才使其精加工钢的性能更接近WC-Co基刀具。

表3.13-4 用于非切削用途的有代表性的硬质合金的常规成分和性质

典型的应用	粘合剂含量(质量分数,%)	晶粒尺寸	硬度 HRA
重型下料冲模和下模，冷镦模	20~30	中	85
镦模（强烈冲击），热成形模，模锻模	11~25	中至粗	84
支承顶挤冲头，热成形冲模	11~15	中	88
支承顶挤冲头，落料冲头，用于高抗剪强度钢的模具	10~12	细至中	89
粉末压实模，森氏极薄钢板轧辊，带材平整轧辊，线材平整轧辊	6	细	92
挤压模(低冲击)，轻载下料模	10~12	细至中	90
挤压模(中冲击)，下料模，剪切刀片	12~16	中	88
耐腐蚀牌号，阀和喷嘴，旋转密封件和轴承	6~12	细至中	92
高耐冲击的耐腐蚀牌号，用于阀和喷嘴、旋转密封和轴承	6~10Ni	中	90
深拉模(无拉伤)，管材的精整心轴	10Co含TiC和TaC	中	91

基于1970年推出的Ti(C、N)-Ni-Mo碳氮化钛金属陶瓷，接着又有了(TiMo)(C、N)基复合物出现，由于其较细的显微组织，它们能提供耐磨性与韧性之间的一种平衡。现在这方面又获得了不断的发展，相继开发了含有各种不同添加剂，如Mo_2C、TaC、NbC、ZrC、HfC、WC、VC、Cr_3C_2和铝的复合金属陶瓷。这些添加剂的不同混合形成耐磨性、耐热震性和韧性的不同性能组合，从而使刀具在很大范围里满足不同的切削用途需要。更新的金属陶瓷用于碳钢和合金钢、不锈钢、球墨铸铁、易切削铝、非铁合金和某些高温合金的半精加工和精加工。金属的切削工艺可以包括车削、镗削、铣削、螺纹切削和槽口的加工工序。利用PVD技术可以对金属陶瓷进行涂层(如TiN)。

钢粘结碳化物。这是一种P/M材料，它们的耐磨性介于工具钢和WC-Co基的硬质合金之间。它们是由(体积分数)25%~45% TiC均匀弥散分布在钢基体里而构成的。基体材料包括工具钢、马氏体时效钢和马氏体不锈钢。

钢粘结的TiC有与之相应的热处理，并且当其粘合剂处于退火状态下时，还可以传统的方法进行切削。充分硬化的钢粘结碳化物可以使用不同的温度回火，以此获得比WC-Co更好的韧性。然而，这种韧性的提高伴随着一定的硬度丧失。由(体积分数)45% TiC构成的钢粘结碳化物的密度大约只有WC-Co可使用牌号的一半。当为航天、航空的飞行器或为高速旋转设备设计耐磨零件时，这是一个重要的考量。

钢粘结碳化物并不推荐用于切削用刀具，因为它在由切削引起的高温下，硬度会急剧下降。然而它们应用于各种不同的非切削的耐磨损用途，例如温、热金属加工工具和模具。

精选参考文献

- K.J.A. Brookes, *World Directory and Handbook of Hardmetals*, 5th ed., International Carbide Data, 1992.
- J. R. Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Tool Materials*, ASM International, 1995.
- J.L. Ellis and C.G. Goetzel, Cermets, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 978–1007.
- H.E. Exner, Physical and Chemical Nature of Cemented Carbides, *Int. Met. Rev.*, Vol 243 (No. 4), 1979, p 149–173.
- H.S. Kalish, Corrosion of Cemented Carbides, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 846–858.
- A.T. Santhanam, P. Tierney, and J.L. Hunt, Cemented Carbides, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 950–977.
- A.T. Santhanam and D.T. Quinto, Surface Engineering of Carbide, Cermet, and Ceramic Cutting Tools, *Surface Engineering*, Vol 5, *ASM Handbook*, ASM International, 1994, p 900–908.
- H.J. Scussel, Friction and Wear of Cemented Carbides, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol 18, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, p 795–800.

第 14 章　特种用途材料

本章的部分内容是根据以下章节内容精简而成。《ASM 手册》第 2 卷性能和选择：非铁合金和特殊用途材料，1990，761 ~ 1098 页；补充内容还采集自：《ASM 特种手册》铝和铝合金，1993，160 ~ 179 页（铝-基体复合材料）；《ASM 特种手册》耐热材料，1997，389 ~ 414 页（结构用金属间化合物）；《ASM 手册》第 18 卷摩擦、润滑和磨损技术，1992，741 ~ 765 页（滑动轴承和表面硬化合金）；其他有关内容可以查阅本章末所列的精选参考文献。

第 1 节　软 磁 材 料

磁性材料分为硬磁或软磁两大类。硬磁材料的特征就是它经过在强磁场里暴露之后能保留大量的残余磁性。这些材料通常都有数值从几百至几千奥斯特（Oe）的矫顽力 H_c，被认为是永磁铁。矫顽力是材料在磁化之后，将其磁感应减小到零所要求的磁化力的一种度量。与此相对，软磁材料用相对很弱的磁场强度就能磁化，并且当磁场撤去后，它们就回到一种残余磁性相对较低的状态。软磁材料通常表现出数值约为 400A/m（5 Oe）低至 0.16A/m（0.002 Oe）的矫顽力。软磁特性主要应用于任何与改变电磁感应有关的场合，如螺管线圈、继电器、电动机、发电机、变压器、磁屏蔽等。

软磁材料的重要特征包括：①高磁导率；②高饱和感应；③低磁滞能损失；④在交变磁通量用途中的低涡流损失；⑤在低磁场强度中的恒定磁导率和/或磁导率，随温度的变化为最小或一定的值。工艺成本、可获得性、强度、耐腐蚀性和易加工性是几个其他影响软磁材料最终选择的因素。

大批量制造的软磁材料包括高纯铁、低碳铁、硅（电工）钢、镍-铁合金、铁-钴合金、铁素不锈钢和铁氧体（陶瓷）。非晶的软磁材料正在工业性生产，它们特征也将在本文中叙述。

铁磁性质

材料的铁磁和电学性质可以分为两大类：结构敏感的和非结构敏感的。非结构敏感是指其性质不会由于基本成分、少量的某种杂质、热处理或塑性变形的少量变化而受到明显的影响。有几种一般可允许的非结构敏感性质，即饱和磁感应（B_s）、磁阻率（ρ）和居里温度（T_c）。这些性质很大程度上取决于所选择合金的成分，并且在从合金制造成零件的过程里不会有很大的变化。

结构敏感就是会受杂质、残余应变、晶粒尺寸等急剧影响的性质。磁导率（μ）、矫顽力（H_c）、磁滞损失（W_h）、残余磁感应（B_r）和磁稳定性都可以认为是结构敏感的性质。控制结构敏感性质的一种方法就是通过合金的制造工艺和/或使用合适的最终退火热处理。

杂质的影响。在所有的合金里，一般都能发现作为杂质的元素如碳、氧、氮和硫。这些元素即使浓度非常低，也会趋于停留在晶格点阵的间隙处，于是晶格会发生严重的应变。非常小的浓度也能干扰磁畴的自由运动，并削弱其软磁性质。图 3.14-1 所示是含碳量与铁磁滞损失之间的近似关系。磁滞损失与硫和氧含量也有类似的关系。进而，如果碳和/或氮保留在未曾结合的合金里，或者如果这些元素分别超过它们接近室温里的溶解度极限，那么它们能及时迁移，并以一种能钉住磁畴壁的细颗粒的形式析出。这就造成了所谓时效的磁性硬化。

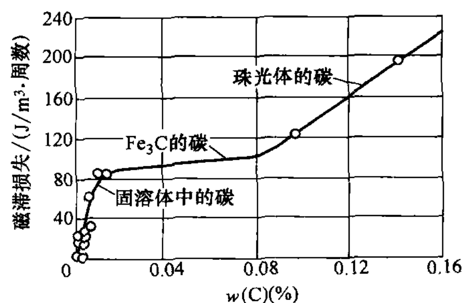


图 3.14-1　非合金化铁的含碳量与铁磁滞损失之间的关系。磁感应 $B = 1T(10kG)$

钢生产厂家通过所使用的原材料和熔化方法使生产的合金中的杂质含量达到一定的标准，以此确保其产品的磁学性能。精密零件的退火能进一步降低杂质，尤其是碳和硫，使之低于仅通过熔化控制就能达到的标准。在铁合金和硅钢中，最终零件的含量应该低于 0.003% C，以此优化其软磁性质，并将时效作用减少到最低限度。

合金化的影响。大多数软磁合金的主要组分为一种或多种普通铁磁元素：铁、镍或钴。这些元素的多数有效组合都有助于对晶格结构的控制，以促使其高磁导率、低矫顽力和低磁滞损失。

某些合金的添加还能增加电阻率，有助于减少在交流装置中的涡流损失。例如纯铁能表现出良好的软磁性和高饱和磁感性。它广泛用于直流用途里和小功率的电动机里，然而其低电阻率会在交流用途里造成高涡流损失。图3.14-2表示出由于各种元素加入到铁中而造成的电阻率改变。

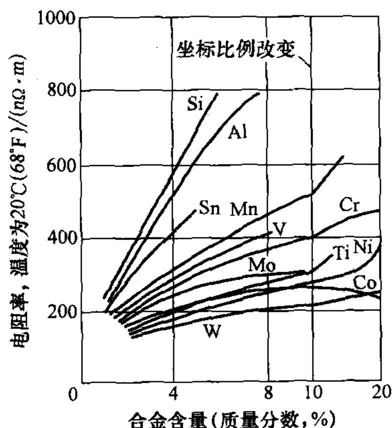


图3.14-2 合金元素对铁电阻率的影响

添加足够量的硅能消除铁中的同素异形转变。因此，硅铁能在高温中退火促使晶粒生长，以促进优化晶粒方位的发展。但是除钴外的其他合金加入，会使室温饱和磁感应减小（见图3.14-3）。

热处理的影响。磁性材料如冷轧状态的铁镍合金，必须通过退火才能形成所需要的晶粒结构和磁学性质。

硅钢所要求的退火条件取决于供应商所采用的工艺以及性价比因素。半制成品牌号钢在其铁心片冲制之后，必须在接近840℃(1550℉)里退火，用以去碳并形成磁学性质。全加工的无取向或有晶粒取向钢的成品牌号钢则要求在750～875℃(1375～1600℉)的温度里退火，这只是为了消除制造应力。对于如用于大功率变压器的平板型宽形铁心片，可以使用无需退火的低应力带材。

晶粒大小的影响。对于大部分的用途，作为无取向材料，其晶体具有的大小应当尽可能的大（见图3.14-4）。在硅钢的取向牌号里具有最佳磁学性质的晶粒尺寸范围一般在2～10mm，并取决于晶粒取向的程度：尺寸超过10mm的晶粒数量增加，将伴之以磁畴壁间距和涡流损失的明显增加。

晶粒取向的影响。所有铁磁晶粒的磁性各向异性——即在不同的晶体学方向具有不同的磁学性质。在镍里，最容易磁化的方向就是立方体的对角线方向〈111〉；在铁里为立方体的棱边〈100〉。因此，晶体的取向是决定和控制磁学性质的基本因素。

高纯度铁

很多年以来，就以研究为目的通过在1300～1500℃(2370～2730℉)的氢气中退火若干小时，而生产出极高纯度的铁(99.99%)。而且有必要通过高温的缓慢冷却以γ相到α相的转变来形成优异的软磁性质。现已获得最高直流磁导率超过10^6的纯铁。

根据测试报告，密度为7.878g/cm^3(0.2846 lbf/in^3)的铁的饱和磁感应为2.158T(21.58kG)。20℃(68℉)时的电阻率为9.8μΩ·cm(59Ω周密耳/ft)，且电阻率的温度系数为0.0065/℃(0.0036/℉)。

纯度为99.6%～99.8%的工业用铁可以制成各种不同的形状。这些铁具有大约2.15T(21.5kG)的饱和

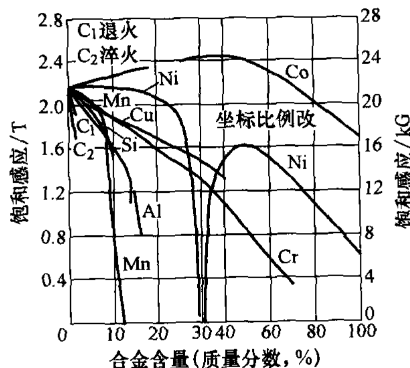


图3.14-3 合金元素对铁的室温饱和磁感应的影响

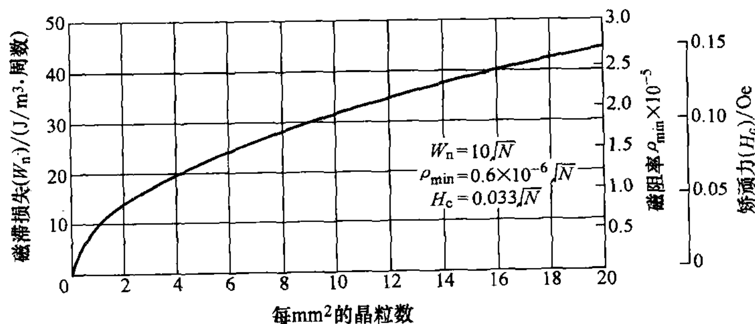


图3.14-4 B=1T(10kG)下，高纯铁的晶粒大小与磁滞损失之间的关系

磁感应、比重 7.86，20℃（68℉）时的电阻率约为 13μΩ·cm。市场供应的低碳磁铁的含碳量低于 0.025%，典型的为 0.010% 或更低。

低碳钢

对要求低于优质磁学性质的用途，有时也使用低碳钢如 1008、1010、12L14 等。这种钢并不按磁学特性的技术指标出售，根据其熔炼方法和供货的物理状态可以表现出相当大的特性差异。如果按照较高特性、软磁的、低碳铁通常所推荐的方法进行退火，用这些钢制成的零件的软磁特征就会得到改善。其改进的程度并不能保证，但是其零件会受到长时间的磁性时效。由于其低成本、实用性和切削性，它们可以作为极靴用于电磁铁、磁性离合器以及其他不太重要使用的磁力搬运机。

压缩铁粉

在一些用途中，另外还需要相当大量切削的复杂磁性零件，可以采用将铁粉放在模具里进行压制，然后在真空或还原的气氛里进行烧结的方法制造。根据粉末冶金(P/M)技术、初始的粉末特性以及最终零件的外形，P/M 成品铁零件的密度范围从 6.2g/cm³（0.224lbf/in³）到可能达到的全密度 7.8g/cm³（0.282lbf/in³）。现已表明磁学性质以及电阻率都是元件密度的函数。较高的饱和磁感应、残余磁感应和最大磁导率都能通过增加密度来实现，而矫顽力和电阻率会因此降低。包括含 0.45%~0.80%P 在内的软磁 P/M 零件的有关规定都包含在 ASTM 标准 A811 和 A839 里。

无取向硅钢

含有少量硅的铁的磁学性质，除饱和磁感应外都比纯铁强。工业用钢含硅量超过 3.5% 的几乎没有，因为其含量超过 4% 的钢会变脆，故难以用冷轧进行加工。

普通应用的工业用牌号硅钢（0.5%~3.5% Si）大多数在电炉或碱性吹氧炉里制造的。无取向牌号在熔炼时要仔细控制其杂质，较好牌号的含硫量大约为 0.01% 或更少一些。可以采用连续铸造和真空脱气的方法。经热轧后的热扁钢进行退火、酸洗和冷轧而成为达到最终厚度的连续卷料。

作为一般用途的牌号带材半成品所经过的脱碳并不充分，所以用户必须对其进行脱碳和退火处理，以提高潜在的磁学特性。在便于实现的退火气氛中，对小型铁心片进行这种工序是切实可行的。成品牌号是在约 825℃（1520℉）和潮湿的氢气中进行带材退火的，以此去碳。最后的退火工序是非常重要的，而且是在较高的温度——用于连续带材高达 1100℃（1520℉）——里进行，以此促使晶粒的生长和磁学性质的形成。使用保护气氛是其关键。退火以后的钢常要用有机或无机材料涂层来减小铁心片叠压中产生的涡流。

绝大多数的成品无取向硅钢产品是以全宽的卷料（860~1220mm 或 34~48in）或窄宽的卷料供货，但也有些是以剪断薄板的形式出售的。

ASTM 和 AISI 规定了电工钢的标准牌号。1946 年采用的 AISI 代号统一了过去所用的各种不同用语。初始采用时，AISI 的代号数字近似于十倍的最大铁心损耗，以 W/lb 表示；并且当在 1.5T(15kG) 的磁通量密度和 60Hz 的磁路频率中进行试验时，用 29 种厚度试样表示。

现用的 ASTM 代号能表示更为特定的信息。一种典型的 ASTM 代号为 47S200。ASTM 代号的前两位数字代表以 mm 表示的厚度（×100）。这两个数字后面跟随的一个字母（C、D、F、S、G、H 或 P）代表材料的种类以及各种磁学试验条件。最后三个数字代表最大允许铁心损耗，用单位（W/kg）×100 或（W/lb）×100 表示。如果铁心损耗值用 W/kg 表示，则牌号的代号以位于字尾的 M 表示 ASTM 的米制标准。有若干种 ASTM 平轧产品的技术标准是以英语和米制为版本的，如 A677-84 及其姊妹篇公制技术标准 A677M-83。表 3.14-1 简要概括了 ASTM 字母编码代号。参阅 ASTM A664 标准可以得到识别方法的完整解释及适用于试验参数的条件。在 60Hz 和 1.5T(15kG) 时的典型磁导率相对峰值和能产生 1.5T(15kG) 磁感应的一般 60Hz 时的激励磁方均根值(rms)，对于这些材料的使用是很有用的设计参数。在较低含硅量的钢里，能获得高磁感应下的最佳磁导率。具有较高含硅量、较大晶粒、较低的杂质含量及较薄的厚度能获得较低的铁心损耗。电动机的铁心片最好采用无取向硅铁。表 3.14-2 列出了电工钢薄板和带材的典型用途。

表 3.14-1　电工钢和铁心片钢牌号的 ASTM 字母编码代号（ASTMA664 标准）

字母编码	牌　号	状　态	铁心损耗，循环频率 f 为 60Hz			
			磁感应 B		试验样件(Epstein)	样件条件
			T	kG		
C	低碳铁心片钢	成品	1.5	15	50/50 晶粒铁耗试验	剪切的
D	低碳铁心片钢	半成品	1.5	15	50/50 晶粒铁耗试验	经退火提高特性①

（续）

字母编码	牌　号	状　态	铁心损耗，循环频率 f 为 60Hz			
			磁感应 B		试验样件(Epstein)	样件条件
			T	kG		
F	无取向电工钢	成品	1.5	15	50/50 晶粒铁耗试验	剪切的
S	无取向电工钢	半成品	1.5	15	50/50 晶粒铁耗试验	经退火提高特性①
G	晶粒取向电工钢	成品	1.5	15	平行晶粒铁耗试验	经退火消除应力②
H	晶粒取向电工钢	成品	1.7	17	平行晶粒铁耗试验	经退火消除应力②
P	晶粒取向电工钢，高磁导率	成品	1.7	17	平行晶粒铁耗试验	经退火消除应力②

注：有关试验方法、热处理等详请参阅 ASTM 标准。

①提高特性的退火——790℃(1450℉)或845℃(1550℉)均热 1h。温度取决于特定牌号。　②消除应力退火——通常范围从 790℃(1450℉)~845℃(1550℉)，历时 1h。

表 3.14-2　电工钢薄板和带材的硅含量、密度和用途

ASTM 技术标准	AISI 标准	(Si + Al)名义含量(%)	假设密度/(g/cm³)	特征和应用
铁心片钢				
A726 或 A840	—	0	7.85	高磁饱和，磁学性质不能保证；中负荷小型电动机
无取向电工钢				
A677 或 A677M(成品)和 A683 或 A683M(半成品)	M-47	1.05	7.80	塑性、好冲压性、高磁感应中的好导磁性；小型电动机，镇流器、继电器
	M-45	1.85	7.75	好冲压性，中和高磁感应中的好导磁性，好铁心损耗；小型发电机，高效率、连续负荷的旋转机械，交流和直流
	M-43	2.35	7.70	
	M-36	2.65	7.70	低和中磁感应中的好导磁性，低铁心损耗；高电抗铁心，发电机，高效旋转机械的定子
	M-27	2.80	7.70	
	M-22①	3.20	7.65	低磁感应中的极好导磁性，最小铁心损耗；小功率变压器，高效旋转机械
	M-19①	3.30	7.65	
	M-15①	3.50	7.65	
取向电工钢				
A876 或 A876M	M-6	3.15	7.65	当磁通量通路平行于轧制方向时，晶粒取向钢具有高方向性磁学性质、最低铁心损耗和最高磁导率的高方向性磁学性质；用于功率变压器的厚铁心片，一般用于分配变压器的较薄铁心片，由于较低的铁心损耗而节省能耗
	M-5	3.15	7.65	
	M-4	3.15	7.65	
	M-3	3.15	7.65	
高磁导率取向钢				
—	—	2.9~3.15	7.65	高运行磁感应中的低铁心损耗

①仅 ASTM A677。

取向硅钢

硅钢中的晶粒大小对于铁心损耗和低磁通量密度的磁导率是很重要的。然而，晶体学位向是高磁通量密度的磁导率的一个主要控制因素。硅钢像铁一样较为容易沿立方的棱边{100}被磁化。

当纯铁中的硅含量超过大约2.5%时铁从α相到γ相的同素异形转变受到抑制。这种转变的缺失使得较高的硅铁合金成为完全的铁素体直到其熔点。由于这种特性，使得这类带材产品的制造可以采用特殊冷轧和热处理技术，以此促成在最终退火中的二次再结晶。这种技术还有利于形成其立方体棱边平行于轧制的方向{110}〈001〉的结晶结构，即通常所指的高斯(Goss)或沿立方体棱边位向。传统的取向(各向异性)牌号都含有大约3.15% Si。

大约在1970年，通过成分和工艺的改进，开发了一种经增强的{110}〈001〉晶体学织构。这种经改良的高磁导率材料通常含有约2.9%~3.2% Si。传统晶粒取向的3.15% Si钢的晶粒直径约为3mm(0.12in)。高磁导率硅钢的晶粒可能约为8mm(0.31in)或更大。从理论上讲，晶粒的直径应该小于(原文如此，似应为不小于——译者注)3mm(0.12in)，才能使来自磁畴壁运动的过量超大涡流效应降到最低限度。特殊涂层能提供电绝缘以及在钢基体里引发拉应力。这时所产生的应力能降低铁心损耗和使变压器的噪声降至最小(表3.14-2)。

由轧钢厂得到的高牌号硅电工钢是不进行明显时效的，因为其含碳量已经减少至0.003%甚至更少。较高的含碳量则由于碳化物的析出而使铁心损耗随时间而增加。还有，硅钢如果没有以一种能使其物理结构完全稳定的正确方式进行热处理，硅钢就会发生明显的时效。

铁-铝合金

虽然铝和硅对铁的电阻率和某些磁学性质有相似的影响，但是铝却很少代替硅，因为会由其造成制造上困难。铝最常见的是少量(<0.5%)加入较好牌号的无取向硅钢，用以提高电磁率并因此减小涡流，同时却不会对其冷变形加工性产生不利影响。含有12% Al或16% Al的铁合金具有高电阻率和高磁导率。在低磁通量密度下，这些合金所形成的磁学性质能接近某些低镍量的镍-铁合金的性质。

镍-铁合金

在镍-铁合金中，镍含量对退火后的饱和磁感应和对初始磁导率的影响分别如图3.14-5和图3.14-6所示。其他元素，尤其是铝常以不同的含量加入这些合金，能形成或强化特定的特征。

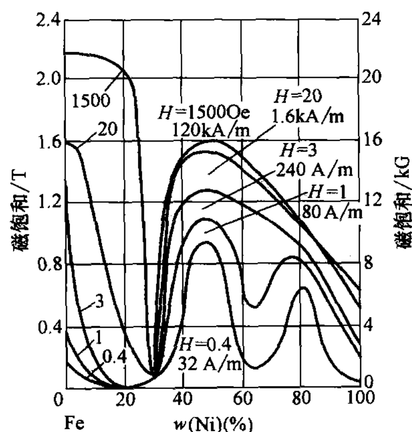


图3.14-5　不同磁场强度中镍铁合金的磁饱和强度。所有的试件在1000℃(1830℉)中退火，然后炉冷

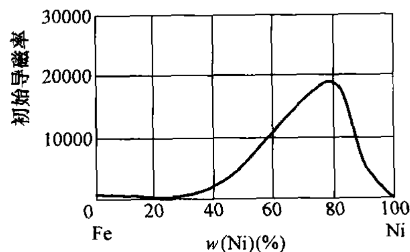


图3.14-6　退火Ni-Fe合金在2mT(20G)时的初始磁导率

如同所有的磁性材料，镍-铁合金的磁学性质受控于饱和磁化和磁性各向能量。在各种不同类型的磁性各向能量中的磁性晶体和磁致伸缩的各向异性是其系统中最重要的。在镍-铁系统中已经开发成功两大类别。高镍合金(大约79% Ni)具有高初始磁导率(见图3.14-6)但低饱和磁感应(约为0.8T或8kG)，而低镍合金(大约50% Ni)具有较低的初始磁导率，但是较高的饱和磁感应(1.5T或16kG)。

图3.14-7中所示的曲线是出自早期的实验室研究，表示成分和热处理对于初始磁导率(μ_0)的影响。工业上可以从50% Ni合金里获得约大于1.2×10^4的μ_0值，而μ_0值约大于6×10^4的可以从含有4% Mo的79% Ni合金里获得。

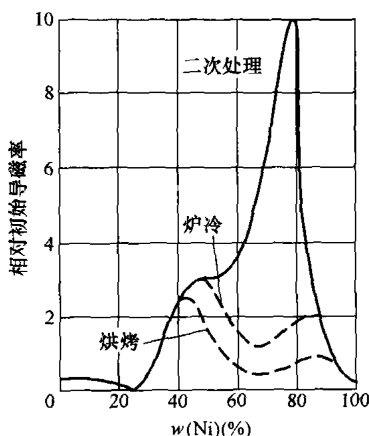


图3.14-7 经过不同热处理的镍铁合金在2mT(20G)时的相对初始磁导率。处理如下：炉冷——900～950℃(1650～1740℉)1h，以100℃/h(180℉/h)冷却；烘烤——炉冷加上450℃(840℉)20h；二次处理——炉冷加上600℃(1110℉)1h，并以1500℃/min(2700℉/min)冷却

为了得到高初始磁导率，必须使磁性晶体的各向异性(K_1)和磁致伸缩各向异性(λ_s)降到最小。冷却速率——或换而言之，即在临界温度范围从760～315℃(从1400～600℉)内所获得的原子有序程度——对于使K_1最小化的能力产生深远影响。于是，这种合金从热处理温度的冷却必须予以精密的控制，以使$K_1=0$。对于工业实际所使用的约100℃/h(180℉/h)的冷却速率，实现$K_1=0$和$\lambda_s=0$的最佳成分，约为4%Mo和80%Ni。

像超透磁合金(Supermalloy)、钼透磁合金(Moly Permalloy)和海姆(Hymu)80软磁合金这些$K_1=0$和$\lambda_s=0$的工业用合金，全都含有大约4%Mo和80%Ni，而且这些合金的取向性并不重要，但是其纯度会影响磁导率和铁心损耗。必须通过专门的冶炼工艺、叠层片和其他形状铁心片的最终精心退火，将诸如碳和氮的一些间隙杂质减少到最低限度。氧和硫也是属于被去除之列。通过在纯、干的氢气(露点低于-50℃或-58℉)及1000～1200℃(1830～2200℉)的温度中，经过若干小时的退火以减少碳、氮、硫和氧的含量，才能得到镍-铁合金的最佳磁学性质。硫含量超过几ppm和碳含量超过20ppm时，都将有损于最终经退火的磁学性质。

50%Ni合金的大部分应用都是以其高饱和磁感应为基本要求。接近铁-镍系列的中点含量(50%Ni)并不是其关键所在，含量可以从45%～60%变化，但是作为最高饱和磁感应，其含量应当接近50%(见图3.14-5)。这类合金虽然$K_1=0$，但是作为它们在易磁化方向〈100〉上的磁致伸缩常数λ_{100}非常接近于零。因此，初始磁导率仍是合适的并事实上达到了一小的最大值(见图3.14-6)。在某些用途如整流器里，要求有高矩形比——即高的剩磁与饱和磁感应之比(B_r/B_s)。在50%Ni合金中，在磁性晶体的各向异性不为零时，可以在最终高温退火的过程中通过立方体织构的仔细形成而达到极佳的矩形度。因此在镍-铁合金的应用里，要按照所需要的性质组合来控制磁性的各向异性能量、纯度和织构是很重要的。

铁-钴合金

纯铁的饱和磁感应为2.158T(21.58kG)。只有在铁和钴的合金里，才能达到较高的饱和值。已知最高数值为约2.46T(24.6kG)，这是当钴的含量为近35%时。含25%～50%Co合金的使用受限于低电阻率和高磁滞损耗，以及钴的高成本和含有超过30%Co合金的脆性。然而，含有少量钒以及在冶炼中经特殊处理的49Co-49Fe-2V合金，在工业上能冷轧到任何厚度，而且其带材也有足够的塑性可进行冲制和剪切。27Co-0.6Cr-Fe合金比大约50%Co的合金更为容易制造，也较少因应力而受到损伤。进而，经适当退火的27%Co合金能形成适用于直流和交流的用途。交流的用途要求低涡流和磁滞损耗。通过成分和厚度的适当匹配能够将涡流损失降低到最小限度。

铁素体不锈钢

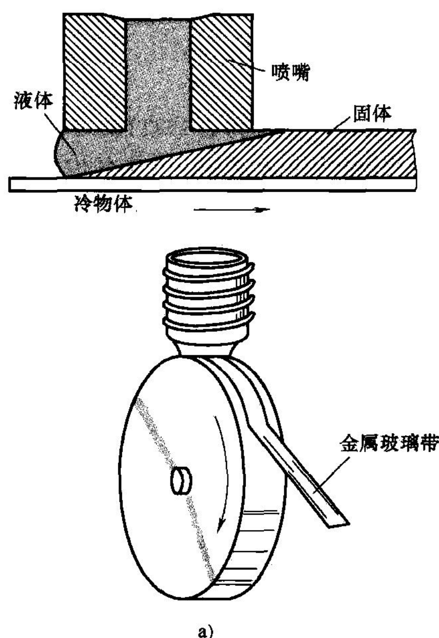
铁素体不锈钢已经在产品中作为软磁元件使用，如螺线管座、铁心和极靴。尽管它们的磁学性质一般不如传统的软磁合金那么好，但是它们已能成功地应用于一些必须承受腐蚀性环境的磁性元件。为此，它们为电镀的铁和硅铁元件提供了一种成本有效的替代。此外，铁素体不锈钢的相对高电阻率还因此有优良的交流特性。

AISI种类的430F在其电磁阀元件上的应用曾经有特别专门的分析。ASTM A838的技术标准为这些合金提供其一般的性能要求。合金种类1含有约0.4%Si和具有电阻率为60μΩ·cm的430F。当经完全轧制退火时，其硬度约为78HRB。它的最大直流磁导率约为2×10^3，矫顽力约为160A/m(2Oe)。合金种类2(430FR)是一种较高硅型的430F，其电阻率为76μΩ·cm，完全退火硬度为82HRH。尽管其较高的硬度，合金类别2一般还具有直流磁导率2.6×10^3和矫顽力130A/m(1.6Oe)。

无定形金属

以无定形、非晶体的形式(金属玻璃)制备的一些适用合金具有一些令人关注的高磁导率和高体积电阻率的性能结合。在目前生产所看好的平面流铸造方法中，金属熔液进入冷却的旋转鼓轮并快速骤冷，形成约 30～50μm 厚和宽达 1m(40in)的长带(见图 3.14-8)。用于软磁用途的合金包括铁-、铁/镍-和钴-基合金，它们含有不同含量的准金属元素(硼、硅、碳和磷)以及其他合金元素如铬、钼、镍、铁和铝。常见的成分例子有：

Fe-基	$Fe_{80}B_{20}$
	$Fe_{80}P_{13}C_7$
	$Fe_{80}P_{16}B_1C_3$
	$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$
	$Fe_{81}B_{13.5}Si_{2.5}C_2$
	$Fe_{76.5}Cr_2B_{16}Si_5Co_{0.5}$
	$Fe_{75}Ni_4Mo_3B_{16}Si_2$
FeNi-基	$(FeNi)_{80}B_{20}$
	$(FeNi)_{80}P_{10}B_{10}$
	$Fe_{40}Ni_{38}P_{14}B_6$
	$Fe_{38.5}Ni_{38.5}P_{14}B_6Al_{1.5}Si_{1.5}$
Co-基	$Co_{72}Fe_3P_{16}B_6Al_3$



a)



b)

图 3.14-8　金属玻璃(无定形金属)带材的制造

a) 平面流铸造方法的原理图。箭头表示材料流动的方向，由其确定冷却轮的旋转方向　b) 由平面流铸造工艺制成的金属玻璃薄板，应用于卷绕功率分配变压器的铁心

这些材料是以低磁滞损失和低矫顽力为其特征的。然而居里温度限制在约 475℃(900℉)，且磁性饱和限制在约 1.7T(16kG)。图 3.14-9 是对无定形金属的磁学性质和传统的晶体软磁材料所作的比较。

作为生产均匀金属玻璃薄板的平面流铸造方法的创新，导致了金属玻璃成为一种铁心材料在功率分配变压器的工业化生产上的应用。电力公司将分配变压器用于电网的终端电压输出，以此把电力供给居民区、商店、办公楼和小型的工厂。

这些变压器的投入应用已经有 25～40 年的时间了，在此期间一次绕组是连续通电的。实际上这种负载型式的特点就是，在整个变压器的工作寿命里，变压器的铁心材料一直处于 50Hz 或 60Hz 的电力交变作用。每经一次交变，在磁性铁心材料里它都要发生能量损耗。此外，交变电磁场还会产生涡流并伴随其在变压器内的损耗。铁心的损失主要决定于矫顽力，而涡流损失与材料的电导率成正比，与绕制铁心的磁性材料的各薄片厚度成反比。

与传统晶体铁心材料(晶粒取向的硅钢)相比，金属玻璃的低电导率使得无定型金属极受重视，这正是由于它能减少涡流损耗。对照晶体材料，低矫顽力能减少铁心损失(无定形金属分配变压器的铁心损失大约为硅钢的 1/3～1/6)。综合由连续平面流铸造工艺所带来低制造成本的这些特点，现已导致金属玻璃进入工业变压器铁心的市场。无定形金属在这方面的使用能减少能源的损耗，从而降低成本。

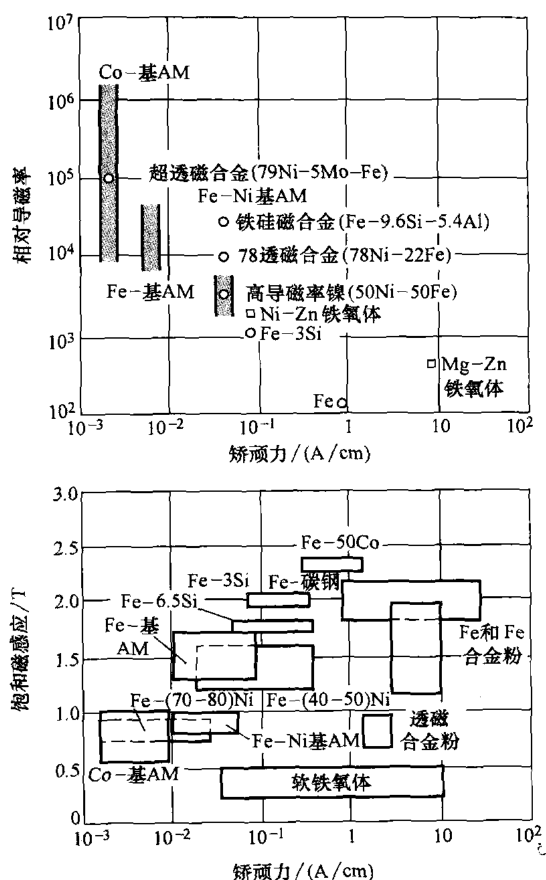


图3.14-9 工业用无定形金属和晶体软铁磁体的饱和磁感应、相对磁导率与矫顽力的关系。无定形金属(AM)的磁导率取决于热处理，并用阴影条柱表示

铁氧体

适用于高频用途中的铁氧体是一种具有尖晶石型磁性结构($M \cdot Fe_2O_4$,其中M为金属)特征的陶瓷，通常由氧化铁的固溶体与一种或多种其他金属如锰、锌、镁、铜、镍和钴的氧化物所组成。它们在磁性材料中的独特之处在于其高频中的突出磁学性质，这种性质又是来自于非常高的电阻率，从大约$10^8\Omega \cdot cm$到高达$10^{14}\Omega \cdot cm$。因此，铁氧体成为一种在会使金属产生过度涡流损失的频率上的理想软磁材料。因为铁氧体具有固有的高耐腐蚀性，故用于制造的零件一般不需要保护性精整。

铁氧体的缺点是与金属相比，它们的低磁饱和、低居里温度和相对较差的力学性能。铁氧体是用粉状原材料通过混合、煅烧、球磨、压制成形和烧制得到所需要的磁学性质。其最终产品是硬、脆且无法进行切削加工，于是精密的尺寸公差必须通过磨削达到。

许多不同的铁氧体都能作为磁体使用。它们可以划分为三大类：用于电脑存储元件的矩形磁滞环铁氧体、用于变压器和电感滤波器的线性铁氧体以及用于微波装置中的微波铁氧体。近年来，由于电脑存储器中半导体使用的增加，矩形磁滞环铁氧体的重要性有所降低。

显微组织和成分对于铁氧体磁学性质的影响要大大超过其对金属的影响。因此成品铁氧体零件的性质会随原材料的纯度和组织而发生急剧的变化，还跟粘合剂的特性以及所采用的陶瓷工艺技术有关。一般来说，锂铁氧体、Mn-Mg-Zn铁氧体和Mn-Mg-Di铁氧体都用于电脑的存储器(Di是钕镨的符号，一种稀土元素钕和镨的混合物)。锂铁氧体的居里温度和饱和磁化强度都比Mn-Mg-Zn和Mn-Mg-Di高，但是开关速度比较低。线性铁氧体包括锰-锌和镍-锌铁氧体。锰-锌铁氧体比较镍-锌铁氧体其饱和磁化强度较高而电阻率较低。锰-锌铁氧体更适用于频率高达约1MHz的情况。Ni-Zn、Mg-Mn-Al和Mg-Mn-Cu铁氧体，另外还有$M_{3+x}Fe_{5-x}O_{12}$(这里M = Y + Al,或M = Y + Gd + Al)型的石榴石，都可以应用于微波的用途。

不随温度而变化的磁导率

所有磁性材料的磁学性质都要随温度而改变。材料的适当选择和制备以及回路的合适设计可以将这种变化减小到最低程度。

铁在四种不同数值的磁化力中进行试验，其磁通量密度随温度的变化曲线如图3.14-10所示。一种磁通量密度为1.5T(15kG)的装置在运行时，受周围运行温度变化的影响是十分轻微的。对所有材料都有类似的这种最小化温度影响，除非处于最佳运行的磁通

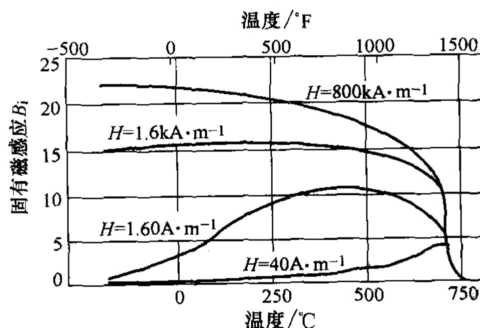


图3.14-10 在四种不同的磁化力作用下，铁的磁感应随温度的变化

量密度要取决于具有给定合适的磁通量密度和温度范围的材料。当温度接近居里温度时，将发生很大的变化(见图3.14-10)。

由于很多原因，并非总有可能为符合温度稳定性而使材料在最佳磁通量密度中运行。获得较好温度稳定性的一种方法就是采用呈绝缘粉末形式的磁性材料，如压制的透磁合金粉末铁心，由于它们存在许多的内部空气间隙，故这种粉末铁心都有很好的温度稳定性。另一种方法就是利用镍-铁合如恒磁导率铁-镍钴合金(Isoperm)或铁-镍基导磁合金(Conpernik)，它们经急剧的冷轧后再经不完全退火，形成一种对温度的变化不太敏感并有部分应变的合金。

第三种方法是将两种温度系数相反的合金粉末结合在一起应用于所需要的温度范围里。在特殊的透磁合金粉末铁心里混有少量具有低居里温度和接近室温的负温度系数的Ni-Fe-Mo粉末。30% Ni铁是属于低居里温度型的。

用于磁性温度补偿的合金

许多测量仪器及其他一些装置都有赖于由永磁铁在空气间隙里形成的可维持不变的磁通量。遗憾的是当永磁铁加热后，强度会降低而且空气间隙里的磁通量密度也会发生改变。为了补偿这种变化，通过在所关注的温度范围内使用一种有高负磁性温度系数的合金，使其有一定量的磁通量分流到仪器的空气间隙范围内。因此分流的磁通量随其周边温度的升高而减少，迫使比通常更多的磁通量通过空气间隙。通过零件的正确设计可以使因温度而造成的磁通量变化得到差不多完全的补偿。电度表和汽车测速表就是其应用实例，它们利用温度补偿器的分流作用，在其整个设计的工作温度范围内对永磁铁磁极强度的改变(以及铝牵引盘的电阻率改变)进行补偿。镍的含量约为28%~36%的镍-铁合金在工业上常被应用于这种目的。

精选参考文献

- R. Ball, *Soft Magnetic Materials*, Heyden & Sons, 1979.
- C.W. Chen, *Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials*, North-Holland, 1977.
- D.W. Dietrich, Magnetically Soft Materials, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 761–781.

第2节 永 磁 材 料

永磁体一词用于表述一种对退磁化场有足够的阻力和足够的高磁通量输出，以能提供有用且稳定磁场的固体材料。永磁体一般都以单一磁性状态应用。这也意味着对于温度效应、机械碰撞以及退磁化场都不敏感。本文将不涉及磁性记忆或记录材料，这些材料在使用过程中的磁性是变化的。但是本文还是要论及电动机中所用的磁滞合金。

永磁材料包括各种合金、金属间化合物和陶瓷。通常包括的一些钢有：Alnico铝镍钴永磁合金(一种铸造或烧结的铁基合金,含有7%~10% Al、15%~19% Ni、13%~35% Co、3%~4% Cu及可供选用的1%~5% Ti)、Cunife铜镍铁永磁合金(60Cu-20Ni-20Fe)、含有钒或铬的铁-钴、铂-钴、硬铁氧体($SrO-Fe_2O_3$ 或 $BaO-6Fe_2O_3$)、钴稀土合金($SmCo_5$ 或 SM_2CO_{17})以及用粉末冶金技术制造的钕-铁-硼合金。上述每一种材料都具有其独特的磁学性质和力学性能、耐腐蚀性、温度敏感性、制造局限性和成本。这些因素为设计者在设计磁性零件时提供了广阔的选择范围。

永磁材料的本质是磁体内部原子和分子矩的结合，以形成一种高磁性感应。这种感应的磁化作用由于有很强的退磁化阻力而得以保留。这种材料分为铁磁性的或铁氧体磁性的两大类，但确实不包括逆磁性或顺磁性材料。天然的铁磁元素为铁、镍和钴。其他元素如锰或铬都能通过合金化而形成适当的原子间距并成为铁磁性的。铁磁性金属结合其他金属或氧化物形成铁氧体磁性物质，陶瓷磁体也属于这种类型。虽然科技文献介绍了许多磁性物质，但是相对很少能为市场接受，因为市场所要求的是高效和低成本。

永磁材料所要开发的主要磁学特征为：高磁感应、高退磁化阻力和最大磁能积。磁感应受限于成分，人们发现二元铁-钴合金具有最高饱和磁感应。退磁化阻力受成分的制约在程度上还不如受其形状或晶体各向异性以及将材料再细分成显微区域的机制的制约。析出、应变和其他材料缺陷，以及颗粒的细化技术都用于获得特征性的退磁化阻力。

最大磁能积是最重要的，因为永磁体主要用于产生磁通场(它是一种潜能的形式)。作为材料的最大磁能积和某些其他特征最好用其磁滞回曲路线来表征。对样品逐次地应用磁化场和退磁化场并观察其相关的磁感应，以此测量其磁滞。

磁学基础

在研究一个永磁体时，用磁力线代表磁通场的法拉第定义是非常有用的。磁力线从北极辐射出来并回

到南极。这些磁力线可以通过将铁粉撒在覆盖在磁棒上面的纸上所形成的粉末图形予以显露。单位面积通过的磁力线数量就是磁感应强度并用 B 代表。磁体里的磁感应是由因磁场而生成的磁力线和因磁体的铁磁性而生成的磁化线所组成：

$$B = H + B_i \tag{3.14-1}$$

式中，H 为磁场强度，B_i 为固有磁感应。

磁滞。磁滞回路线就是一种表征永磁体的通用方法。通过磁场强度的变化来测量固有磁感应（见图3.14-11）。在原点以材料的原始状态开始，随磁场强度从零到最大，其磁感应沿曲线 I 增加到标记为 $+S$ 点。$+S$ 点就是若磁场强度继续增加而磁感应不再增加的那一点，即所谓的饱和磁感应。当永磁体的磁场强度减小至零时，继续保持着大部分磁感应。在图3.14-11里，当磁场强度减小经过零并反向到 $-S$ 时，磁感应从 $+S$ 到 B_i，再到 $-S$。故当磁场强度为零时，样品里存在着一个定义为 B_r 的剩余磁感应强度，对于制备良好的永磁材料，B_r 值趋近饱和磁感应强度。在磁滞回路线中的这一点称之为残余磁感应强度。

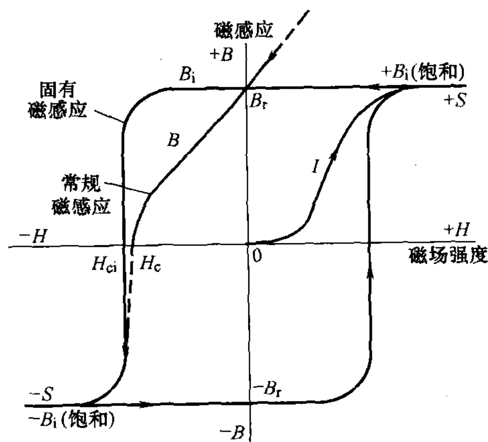


图3.14-11 永磁材料的主磁滞回路。B_i（饱和）为饱和磁感应

如果磁场强度再度朝正的方向增加，那么如图所示磁感应强度经过 $-B_r$ 到 $+S$，却不经过原点。这里存在一个磁滞效应，而这种曲线图称为磁滞回路曲线。回路的两半一般是对称的，并构成一主回路，它代表了最大磁能积或能储存于材料中的磁性能量。在一个主回路内，会有无数微小回路，在运行条件下可通过测量表明磁体上较小磁场的这种效应。

退磁作用。为使 B_i（或 J）减小到零，所需要的一定大小退磁磁场强度称为固有矫顽力 H_{ci}。图3.14-11上还有由固有曲线导出的常规退磁曲线。使磁感应 B 减小到零所需要的磁场强度就是常规矫顽力 H_c。曲线应用于永磁材料的重要实用性特征就是 B_r、H_c、H_{ci}和磁滞回路线所包络的面积的这些数值。

因为永磁体最为常用的是在其自身周边空间所形成一个磁通磁场，而材料则处于其自己的自退磁磁场内。因此，在实际应用中，磁体设计人员主要对磁滞回路线被称为退磁曲线的第二象限感兴趣（见图3.14-12）。这条曲线代表退磁阻力，而且肯定地说，也是在空气间隙或邻近磁体材料的地方建立磁场的能力。

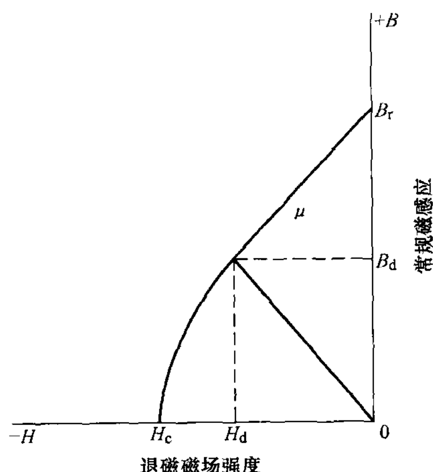


图3.14-12 永磁材料的常规退磁曲线

磁能。磁体周边能够使用的最大磁能，与在常规退磁曲线内部所能内接的最大矩形成正比。它由乘积 $(B_dH_d)_{最大}$表示，并且通常将其作为确定永磁材料特性的指数。

在运行点的磁导率（即磁感应强度同相应的磁化力之比）是对于在不断变化的退磁化条件下选用永磁材料的一个有用的特征参数：

$$\mu = B_d/H_d \tag{3.14-2}$$

举例说，一条直线型退磁曲线中 $B_r = H_c$，是理想的磁导率，为1.0，当将部分退磁场撤除时，这种材料的磁体将能自动恢复全部磁通。相应的固有曲线在其弯曲以外，处处都是平的，并且材料也将保持最大能量。稀土合金和高矫顽力的硬铁氧体磁体都具有最接近理想永磁体的特性。

图3.14-13所示是沿退磁曲线上每一点上的 B 和 H 的乘积曲线，曲线是相对于 B 而作的。在退磁曲线上，每一个 B 或 H 的数值都有对应的另一数值作为其坐标变量。它们的乘积最大值——$(B_dH_d)_{max}$——代表单位体积的材料在空气间隙里所能产生的最大磁能。作为磁体的最高效率设计，往往就是使用具有在

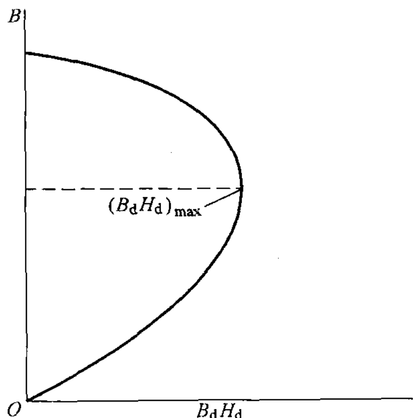


图 3.14-13 永磁材料的典型能积曲线

相应于$(B_dH_d)_{max}$值时的磁通量密度的磁体。

在一个开放回路条件下，运行的磁体所能拥有的总外部磁通量(也即在空气或非磁物质中的一些磁通量)取决于它的形状。图 3.14-14 所示是一个特定形状的这种关系。导磁率μ是总的外部导磁性B_d与由磁体所占据空间里的磁导性H_d之比值，即等于退磁曲线的斜率。

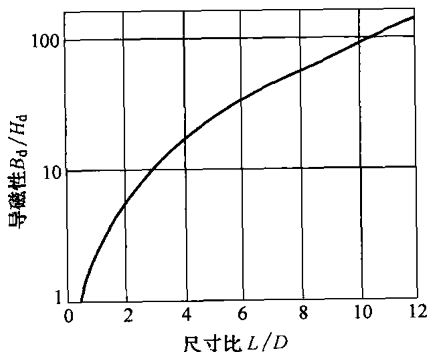


图 3.14-14 圆形横截面直棒磁体的磁学性质与尺寸之间的关系

图 3.14-15 所示是固有磁感应曲线的第一和第二象限放大图形。无论材料科学家还是应用工程师都对固有退磁曲线感兴趣。材料科学家关注的是有关成分和工艺对于材料的各种固有参数，如B_{is}、B_r和H_{ci}的影响。而应用工程师关心的是有关由B_i和H而在空气间隙中引起的磁通量密度，因而他们感兴趣的是常规磁感应曲线和B_r、H_c以及$(BH)_{max}$的值。设计工程师可以利用固有磁感应曲线预测磁体在温度、电枢反应或其他退磁力影响下的性能。

恒能积(B_dH_d)曲线通常画在一个磁滞回路线的第二象限的范围里。如图 3.14-16 所示，它们看

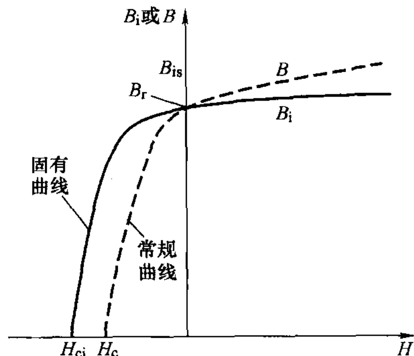


图 3.14-15 第一和第二象限的本征磁化曲线B_i，并与B曲线作比较

上去像一系列的双曲线叠加在退磁曲线的矩形B-H框架上。由此不难确定外部磁能的最大值与退磁曲线之间的关系。框架的这种形式为设计人员提供一种有效的指导。事实上，有着固定空气间隙的磁体在相应其所用材料的退磁曲线上会有一个固定的B_dH_d工作点。对于会变化的空气间隙，例如电动机里由电枢与磁场极之间的相对运动所形成的间隙，则在该空气间隙里可能产生的外部磁能也随之连续变化，从而形成有所谓最大和最小值的小磁滞回路线。实际上，将小磁滞回路线画在退磁曲线上，以此确定该回路在曲线上的位置，并评价在小磁滞回路线循环中的磁通量变化程度。使用永磁体的设备如永磁电动机、小型发电机和电动机的有效设计都要求小磁滞回路线在靠近(B_dH_d)点工作。

磁性软材料不同于永磁材料，这不仅在于其较高的磁导率，而且更为明显的是在于其低得多的退磁阻力。最佳磁性软材料具有事实上为零的H_c值。这种材料的磁滞回路线在每一次循环中都要让其自身通过或接近原点。

而相反的，永磁材料具有很宽的磁滞回路线，其特征是高H_{ci}值，范围大约从 8 ~ >1.6×10^3kA/m (100Oe ~ >20kOe)。

永磁材料

成分和性质。表 3.14-3 选列了美国工业用永磁材料及其名义成分。它们的磁学性质如表 3.14-4 所示。物理性质和力学性能概括在表 3.14-5 里。通过控制永磁材料的生产获得磁学性质，并按照所用的制造工艺使其他性质得以改变。根据特定用途，选择材料和设计永磁体是一种具有鲜明意义的工程艺术，而且还能从大多数的制造厂家那里获得帮助。

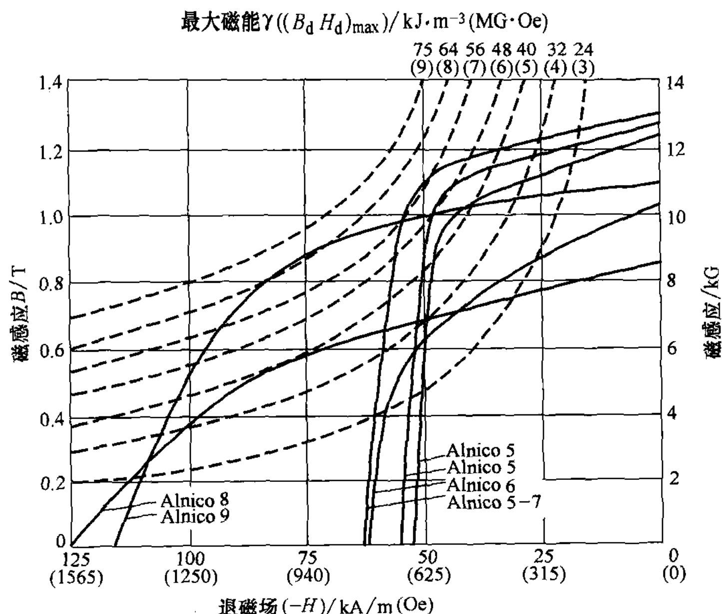


图3.14-16　铸造各向异性铝镍钴(Alnico)永磁材料的磁化曲线

表3.14-3　选列永磁材料的名义成分、居里温度和磁性方位

代　号	名义成分	大约居里温度 ℃	大约居里温度 ℉	磁性方向①	代　号	名义成分	大约居里温度 ℃	大约居里温度 ℉	磁性方向①
3½% Cr 钢	Fe-3.5Cr-1C	745	1370	无	烧结 Alnico 8	Fe-7Al-15Ni-35Co-4Cu-5Ti	860	1580	Y，H
6% W 钢	Fe-6W-0.5Cr-0.7C	760	1400	无	Cunife	20Fe-20Ni-60Cu	410	770	Y，R
17% Co 钢	Fe-17Co-8.25W-2.5Cr-0.7C	—	—	无	粘结铁氧体 A	$BaO-6Fe_2O_3$ + 有机物	450	—	无，P
36% Co 钢	Fe-36Co-3.75W-5.75Cr-0.8C	890	1630	无	粘结铁氧体 B	$BaO-6Fe_2O_3$ + 有机物	450	—	无
铸 Alnico 1	Fe-12Al-21Ni-5Co-3Cu	780	1440	无	烧结铁氧体 1	$BaO-6Fe_2O_3$	450	840	无，P
铸 Alnico 2	Fe-10Al-19Ni-13Co-3Cu	810	1490	无	烧结铁氧体 2	$BaO-6Fe_2O_3$	450	840	Y，A
铸 Alnico 3	Fe-12Al-25Ni-3Cu	760	1400	无	烧结铁氧体 3	$BaO-6Fe_2O_3$	450	840	Y，A
铸 Alnico 4	Fe-12Al-27Ni-5Co	800	1475	无	烧结铁氧体 4	$SrO-6Fe_2O_3$	460	860	是
铸 Alnico 5	Fe-8.5Al-14.5Ni-24Co-3Cu	900	1650	Y，H	烧结铁氧体 5	$SrO-6Fe_2O_3$	460	860	是
铸 Alnico 5DG	Fe-8.5Al-14.5Ni-24Co-3Cu	900	1650	Y，H，C	粘结钕	NdFeB + 有机物	—	—	Y，P，E
铸 Alnico 5-7	Fe-8.5Al-14.5Ni-24Co-3Cu	900	1650	Y，H，C	热成形钕	—	—	—	Y，R
铸 Alnico 6	Fe-8Al-16Ni-24Co-3Cu-2Ti	860	1580	Y，H	热压钕	NdFeB + 有机物	—	—	Y，R
铸 Alnico 7	Fe-8Al-18Ni-24Co-4Cu-5Ti	840	1540	Y，H	烧结钕	NdFeB	310	590	Y，A
铸 Alnico 8	Fe-7Al-15Ni-35Co-4Cu-5Ti	860	1580	Y，H	FeCrCo	—	640	1185	Y，R
铸 Alnico 9	Fe-7Al-15Ni-35Co-4Cu-5Ti	—	—	Y，H，C	铂钴	76.7Pt-23.3Co	480	900	无
铸 Alnico 12	Fe-6Al-18Ni-35Co-8Ti	—	—	无	钴稀土 1	$SmCo_5$	725	1340	Y，A
烧结 Alnico 2	Fe-10Al-17Ni-12.5Co-6Cu	610	1490	无	钴稀土 2	$SmCo_5$	725	1340	Y，A
烧结 Alnico 4	Fe-12Al-28Ni-5Co	800	1475	无	钴稀土 3	$SmCo_5$	725	1340	Y，A
烧结 Alnico 5	Fe-8.5Al-14.SNi-24Co-3Cu	900	1650	Y，H	钴稀土 4	Sm_2Co_{17}	800	1475	Y，A
烧结 Alnico 6	Fe-8Al-16Ni-24Co-3Cu-2Ti	860	1580	Y，H	粘结钴稀土	—	—	—	Y，P，E

①Y，是；H，在热处理时形成方向；C，形成的柱形晶体结构；P或E，在压制或挤压过程中形成的某种方向；R，在轧制或其他机械加工中形成的方向；A，粉末在压实之前由磁性取向而明显形成的方向，但是其取向还要受到压制力的影响。

表3.14-4 所选永磁材料的名义磁学性质

代号	H_c		H_{ci}		B_r		B_{is}		$(BH)_{max}$		B_d		H_d		要求磁化磁场		永磁系数，在$(BH)_{max}$	平均反向导磁率/(G/Oe)
	kA/m	Oe	kA/m	Oe	T	kG	T	kG	kJ/m^3	MG·Oe	T	kG	kA/m	Oe	kA/m	kOe		
3½% Cr 钢	5.3	66	—	—	0.95	9.5	—	—	2.3	0.29	—	—	—	—	—	—	—	—
6% W 钢	5.9	74	—	—	0.95	9.5	—	—	2.6	0.33	—	—	—	—	—	—	—	—
17% Co 钢	14	170	—	—	0.95	9.5	—	—	5.2	0.65	—	—	—	—	—	—	—	—
36% Co 钢	19	240	—	—	0.975	9.75	—	—	7.4	0.93	—	—	—	—	—	—	—	—
铸 Alnico 1	35	440	36	455	0.71	7.1	1.05	10.5	11	1.4	0.45	4.5	24	305	160	2.0	14	6.8
铸 Alnico 2	44	550	46	580	0.725	7.25	1.09	10.9	13	1.6	0.45	4.5	28	350	200	2.5	12	6.4
铸 Alnico 3	38	470	39	485	0.70	7.0	1.00	10.0	11	1.4	0.43	4.3	26	320	200	2.5	13	6.5
铸 Alnico 4	58	730	62	770	0.535	5.35	0.86	8.6	10	1.3	0.30	3.0	34	420	280	3.5	8.0	4.1
铸 Alnico 5	50	620	50	625	1.25	12.5	1.35	13.5	42	5.25	1.02	10.2	42	525	240	3.0	18	4.3
铸 Alnico 5DG	52	650	52	655	1.29	12.9	1.40	14.0	49	6.1	1.05	10.5	46	580	280	3.5	17	4.0
铸 Alnico 5-7	58	730	59	735	1.32	13.2	1.40	14.0	59	7.4	1.15	11.5	51	640	280	3.5	17	3.8
铸 Alnico 6	60	750	—	—	1.05	10.5	1.30	13.0	30	3.7	0.71	7.1	42	525	320	4.0	13	5.3
铸 Alnico 7	84	1050	—	—	0.857	8.57	0.945	9.45	30	3.7	—	—	—	—	400	5.0	8.2	—
铸 Alnico 8	130	1600	138	1720	0.83	8.3	1.05	10.5	40	5.0	0.506	5.06	76	950	640	8.0	5.0	3.0
铸 Alnico 9	115	1450	—	—	1.05	10.5	—	—	68	8.5	—	—	—	—	560	7.0	7.0	—
铸 Alnico 12	76	950	—	—	0.60	6.0	—	—	14	1.7	0.315	3.15	43	540	400	5.0	5.6	—
烧结 Alnico 2	42	525	44	545	0.67	6.7	1.10	11.0	12	1.5	0.43	4.3	28	345	200	2.5	12	6.4
烧结 Alnico 4	56	700	61	760	0.52	5.2	—	—	10	1.2	0.30	3.0	32	400	280	3.5	—	7.5
烧结 Alnico 5	48	600	48	605	1.04	10.4	1.205	12.05	29	3.60	0.785	7.85	37	465	240	3.0	18	4.0

（续）

代号	H_c		H_{ci}		B_r		B_{is}		$(BH)_{max}$		B_d		H_d		要求磁化磁场		永磁系数，在$(BH)_{max}$	平均反向导磁率/(G/Oe)
	kA/m	Oe	kA/m	Oe	T	kG	T	kG	kJ/m^3	MG·Oe	T	kG	kA/m	Oe	kA/m	kOe		
烧结 Alnico 6	61	760	63	790	0.88	8.8	1.15	11.5	22	2.75	0.55	5.5	40	500	320	4.0	12	4.5
烧结 Alnico 8	125	1550	134	1675	0.76	7.6	0.94	9.4	36	4.5	0.46	4.6	80	1000	640	8.0	5.0	2.1
Cunife	44	550	44	555	0.54	5.4	0.59	5.9	12	1.5	0.40	4.0	26	325	200	2.5	12	3.7
粘结铁氧体 A	155	1940	—	—	0.214	2.14	—	—	8	1.0	0.116	1.16	—	—	960	12.0	1.3	1.1
粘结铁氧体 B	92	1150	—	—	0.14	1.4	—	—	3	0.4	—	—	—	—	640	8.0	1.2	1.1
烧结铁氧体 1	145	1800	276	3450	0.22	2.2	—	—	8	1.0	0.11	1.1	72	900	800	10.0	1.2	1.2
烧结铁氧体 2	175	2200	185	2300	0.38	3.8	—	—	27	3.4	0.185	1.85	132	1650	800	10.0	1.1	1.1
烧结铁氧体 3	240	3000	292	3650	0.32	3.2	—	—	20	2.5	0.16	1.6	130	1600	800	10.0	1.1	1.1
烧结铁氧体 4	175	2200	185	2300	0.40	4.0	—	—	30	3.7	0.215	2.15	135	1700	960	12.0	1.2	1.05
烧结铁氧体 5	250	3150	287	3590	0.355	3.55	—	—	24	3.0	0.173	1.73	138	1730	1200	15.0	1.0	1.05
NdFeB（烧结）	848	10600	>1350	>17000	1.16	11.6	—	—	255	32	0.60	6.0	425	5300	>2000	>25.0	1.13	—
粘结 NdFeB	430	5400	720	9000	0.69	6.9	—	—	76	9.5	0.315	3.15	240	3000	—	—	1.05	—
热压 NdFeB	560	7000	1280	16000	0.80	8.0	—	—	110	13.7	0.38	3.8	295	3700	—	—	1.05	—
热成形 NdFeB	880	11000	1200	15000	1.20	12.0	—	—	274	34.2	0.59	5.9	465	5800	—	—	1.05	—
铂钴	355	4450	430	5400	0.645	6.45	—	—	74	9.2	0.35	3.5	215	2700	1600	20.0	1.2	1.2
钴稀土 1	720	9000	1600	20000	0.92	9.2	0.98	9.8	170	21	—	—	—	—	2400	30.0	—	—
钴稀土 2	640	8000	>2000	>25000	0.86	8.6	—	—	145	18	0.44	4.4	330	4100	2400	30.0	—	1.05
钴稀土 3	535	6700	>1200	>15000	0.80	8.0	—	—	120	15	0.40	4.0	295	3700	2400	30.0	—	1.1
钴稀土 4	640	8000	>640	>8000	1.13	11.3	—	—	240	30	0.60	6.0	400	5000	>1600	>20.0	1.2	—

名义成分参见表3.14-3，力学性能和物理性质参见表3.14-5。

表3.14-5　名义力学性能和物理性质

代号	密度/(g/cm³)	抗拉强度		横向断裂模量		硬度 HRC	线膨胀系数		电阻率/(nΩ·m)	最高工作温度	
		MPa	ksi	MPa	ksi		μm/(m·K)	μin/(in·℉)		℃	℉
3½% Cr 钢	7.77	—	—	—	—	60~65	12.6	7.01	290	—	—
6% W 钢	8.12	—	—	—	—	60~65	14.5	8.06	300	—	—
17% Co 钢	8.35	—	—	—	—	60~65	15.9	8.84	280	—	—
36% Co 钢	8.18	—	—	—	—	60~65	17.2	9.56	270	—	—
铸 Alnico 1	6.9	28	4.1	96	14	45	12.6	7.01	750	540	1004
铸 Alnico 2①	7.1	21	3.1	52	7.5	45	12.4	6.89	650	540	1004
铸 Alnico 3	6.9	83	12	157	23	45	13.0	7.23	600	480	896
铸 Alnico 4	7.0	63	9.1	167	24	45	13.1	7.28	750	590	1094
铸 Alnico 5①②	7.3	37	5.4	73	11	50	11.4	6.34	470	540	1004
铸 Alnico 5DG	7.3	36	5.2	62	9.0	50	11.4	6.34	470	—	—
铸 Alnico 5-7	7.3	34	4.9	55	8.0	50	11.4	6.34	470	540	1004
铸 Alnico 6①	7.4	157	23	314	46	50	11.4	6.34	500	540	1004
铸 Alnico 7	7.3	108	16	—	—	60	11.4	6.34	580	—	—
铸 Alnico 8	7.3	64	9.3	—	—	56	11.0	6.12	500	540	1004
铸 Alnico 9	7.3	48	6.9	55	8.0	56	11.0	6.12	—	—	—
铸 Alnico 12	7.4	275	40	343	50	58	11.0	6.12	620	480	896
烧结 Alnico 2	6.8	451	65	480	70	43	12.4	6.89	680	480	896
烧结 Alnico 4	6.9	412	60	588	85	—	13.1	7.28	680	590	1094
烧结 Alnico 5	7.0	343	50	392	57	44	11.3	6.28	500	540	1004
烧结 Alnico 6	6.9	382	55	755	110	44	11.3	6.28	530	540	1004
烧结 Alnico 8	7.0	—	—	382	55	43	—	—	—	—	—
烧结铁氧体 A③	3.7	4.4	0.63	—	—	—	94	52	~10^{13}	95	203
烧结铁氧体 1④	4.8	49	7.1	—	—	—	10	6	~10^{13}	400	752
烧结铁氧体 2	5.0	—	—	—	—	—	10	6	~10^{13}	400	752
烧结铁氧体 3	4.5	—	—	—	—	—	18	10	~10^{13}	400	752
烧结铁氧体 4	4.8	—	—	—	—	—	—	—	10^{13}	400	752
烧结铁氧体 5	4.5	—	—	—	—	—	—	—	10^{13}	—	—
烧结 NdFeB	7.5	830	120	—	—	58	5	3	1600	150	300
粘结 NdFeB	5.8	13.5	2	—	—	36	—	—	10^{9}	130	265
热压 NdFeB	7.5	—	—	—	—	58	—	—	1600	150	300
热成形 NdFeB	7.4	—	—	—	—	58	—	—	1600	150	300
Cunife	8.6	686	99	—	—	95HRB	12	6.7	180	350	662
铂钴	15.5	1370	199	1, 570	230	26	11	6.1	280	350	662
钴稀土⑤	8.2	3430	498	13, 730	1, 990	50	511; 131	284; 72.8	500	250	482

注：成分、居里温度和磁性方向参见表3.14-3，磁学性质参见表3.14-4。

①比热容：460J/(kg·K)[0.11Btu/(lb·℉)]。②热导率：在室温下25W/(m·K)[170Btu·in/(ft²·h·℉)]。③热导率：0.62W/(m·K)[4.3Btu·in/(ft²·h·℉)]。④热导率：5.5/(m·K)[38Btu·in/(ft²·h·℉)]。⑤比热容：380J/(kg·K)[0.09Btu/(lb·℉)]，热导率：15W/(m·K)[104Btu·in/(ft²·h·℉)]。

选择和应用。多年以来，利用永磁体的数量和范围都已急剧增加。一些较为突出的应用包括飞机用永磁电动机、交流发电机、割草机用永磁电动机、园艺拖拉机和外装电动机；小型和大型直流电动机(包括汽车马达)，声波换能器，磁性联轴器，磁性共振影像，磁聚焦系统，电流表和电压表以及电度表。表3.14-6列出不同用途所推荐使用的材料。

表3.14-6　永磁体材料的应用

应　用	推荐用材料	选用的主要理由	替用材料	采用替用材料的条件或理由
飞机永磁电动机，军用或民用	SmCo	单位体积的最大能量	铸 Alnico 5	可行性或成本制约
交流发电机	SmCo	压实性和可靠性	铁氧体 Alnico	使用空间适宜于较低磁性能量和成本的较大材料体积
割草机永磁电机、园艺拖拉机、外装发动机	铁氧体	成本比 Alnico 低并足够的磁性能量	Alnico NdFeB	要求较高能量的材料
小型直流马达	粘结铁氧体	形状适合制造，成本较低并足够的磁性能量	粘结 NdFeB 烧结铁氧体	要求较高能量的材料
大型直流马达	SmCo	单位体积的最大能量	NdFeB	要求成本较低，工作温度低
汽车直流马达	铁氧体	成本比替用材料低并足够的磁性能量	粘结 NdFeB	较高磁性能量和较轻重量
汽车起动马达	铁氧体	成本较替用材料低并足够的磁性能量	粘结 NdFeB	较高磁性能量和较轻重量
动圈马达(电脑)	NdFeB	高能量	SmCo	可行性
声波换能器	铁氧体	低成本	NdFeB	较高磁性能量并要较小的尺寸和重量
磁性联轴器(小间隙)	铁氧体	成本较低并足够的磁性能量	粘结 NdFeB	要求较高的转矩
磁性联轴器(大间隙)	NdFeB	高能量	SmCo	高工作温度
传送系统	NdFeB	高能量	SmCo	可行性
分离器	铁氧体	成本较低并足够的磁性能量	NdFeB	要求高磁性能量
磁性共振影像	NdFeB	高能量	铁氧体	使用空间适宜于较低能量的较大材料体积
磁聚焦系统	NdFeB	高能量	SmCo	要求高工作温度或低温度系数
同步磁滞马达	各向同性 FeCrCo	形状适宜用锻压材料制造	钴钢	可行性
夹持装置	铁氧体	成本较低并足够的磁性能量	Alnico	夹持力对温度必须在大范围里保持不变
电流表和电压表	Alnico	低温度系数	不能	—
电度表	Alnico 5 或 6	低温度系数	不能	—

最佳的合金应用

稳定化和稳定性

有一类重要的永磁体应用，磁体强度非常微小的变化(1%或更小)也会强烈地影响其装置的精度和性能。这些应用包括用于电度表的制动磁体、磁控管磁体、特殊转矩马达磁体以及大部分直流仪表板和交换机的仪器磁体。这种装置的运行要求在一个中档的调节范围里有极高的精度或者在一个极大调节范围里具有中等的精度。

如果已知调节的特性和幅度，常有可能预测磁通量的变化。也可以通过将磁体预先置于一定的感应之中，以使其对在以后使用时的改变不会再敏感。仪器里的永磁体已在许多年里保持数量级为千分之一(0.1%)的长期稳定性。最近，根据有关航天飞行器的惯性制导系统的调查表明，其长期稳定性已经能够达到约1～10ppm(0.0001%～0.001%)。以现代永磁

体所能取得的这种令人难以置信的稳定性与非常早以前的(钢)永磁体不稳定呈明显的对照，后者在组织和磁性方面的变化都会造成磁化强度随时间的显著衰减。

不可逆变化

磁化强度随时间的衰减可以分为可逆和不可逆两种。不可逆变化定义为一种性质在造成其某些变化的影响被撤销之后，还能继续保留的这些性质上的改变。例如，如果一种磁体在高温的影响下丧失其磁场强度，然而当磁体又冷却回到室温而其磁通量却不恢复到原来的数值，磁体的这种变化就认为是不可逆的。

温度的影响。磁体的性质以一种通常可预测的方式随温度而变化。B_{is}随温度的变化可以通过理论来进行计算，只要具备磁相的晶体结构和磁性结构的丰富知识。对于许多其他影响因素，有关的知识尚不具备，但B_{is}对于T的直接测量也是可行的。不可逆与可逆的两种磁化损耗都有资料可查。

H_{ci}随温度的变化可以从其各向异性和磁化强度随温度的变化进行预测。这支持所有各向异性的物理缘由都源自于H_{ci}的认识。在具有明显形状各向异性的情况下，计算和实验的两者结果都能很好地吻合，尤其考虑到小晶体各向异性所起的作用时。以Alnico为例，晶体各向异性较为明显。此外，对于非磁相的影响有较大的不确定性，特别在较低温度下非磁相会有助于相当大的磁化作用。对于钢磁体，由于夹杂物的作用使其与温度的相关性很难进行预测。随着温度的变化，退磁曲线的形状和峰值都要发生变化。

冶金状态的变化。不同合金的不可逆变化开始发生在不同的温度。这种变化通常取决于时间和温度，而在高于推荐温度中短时间暴露还是允许的。如在Alnico和Cunife中，这种变化能以析出物生长的形式发生，在Alnico中以另一种相析出如γ析出，在铂-钴中以一种有序相数量的增加，在$SrO \cdot 6Fe_2O_3$中作为一种晶粒尺寸的增大，与金属发生的氧化反应或与氧化物发生还原反应、辐射损坏、开裂或尺寸改变。

不可逆的冶金变化常会受到抑制，通过选择适当的热处理可以使其原始的性质得以恢复。例如，若Alnico 5因处于700℃(1290℉)而发生劣化，可以通过将其在1300℃(2370℉)里固溶处理、再在磁场中冷却、然后在600℃(1110℉)中时效，以此重新达到最佳金相组织。

已知核环境会造成金相组织的改变，从而造成磁学性质的改变。试验表明，永磁材料不受剂量低于大约3×10^{17} n/cm^2(2×10^{18} n/in^2)的中子(n)辐射的影响。随后工作在高达10^{20} n/cm^2(6×10^{20} n/in^2)剂量辐射里时，则显示有些劣化。Alnico材料不受中子能超过0.4eV的剂量高达5×10^{20} n/cm^2(3×10^{21} n/in^2)辐射以及中子能超过2.9MeV的剂量高达2×10^{19} n/cm^2(1×10^{20} n/in^2)辐射的影响。还发现辐射作用与温度无关，但是高温可能会抵消辐射的作用。较新开发的永磁材料，如Sm_2Co_5和NdFeB对辐射较为敏感。

磁态的变化。通过如周边温度变化或在材料内部具有统计意义上的局部温度波动的温度效应，如机械冲击或声学噪声的机械效应、或如外磁场、回路磁阻变化或磁表面接触的磁场效应都会引起磁态的变化。所有这些情形里的磁化强度损耗都能借助再度磁化而得到恢复。

机械冲击和振动能将能量添加到永磁体上，并以在热能中曾讨论过的相同方式降低其磁化强度。惟一不同的是赋予磁体的热能精确地表示为kT，此处k为波尔兹曼(Boltzmann)常数和T为温度，而赋予的机械能通常是未知的。因此重复的冲击或连续的振动应该按与热效应相同的对数关系降低磁化强度，只是其时间必须更换，如改为冲击的次数。

在将机械效应降至最低限度的稳定化方面做的工作很少，因为也没有什么必要。一般都觉得现代的永磁材料并不受机械冲击的影响。

可逆变化

由于如温度或外磁场的干扰影响而造成磁化强度的损失，如果当干扰影响撤销后，磁体的原始性质得以复原，则可认为这种磁化强度的变化是可逆的。

恒定温度下的时间效应。当铁磁材料的作用磁场发生突然改变时，其磁化强度无法在瞬间达到平衡值。这种对于时间的依赖性可以是由于涡流效应或由于可逆或不可逆的磁性粘滞度所致。一般来说，涡流效应仅对非常短暂的时间——通常在作用磁场变化后小于1s之内——才重要。这种影响这里不予考虑。已经证明，可逆磁性粘滞度是因为晶格里的离子扩散而引起的，并因此具有一种扩散过程的时间-温度相关特征。其时间常数为：

$$\tau = \tau_\infty \exp(E/RT) \qquad (3.14\text{-}3)$$

式中，τ_∞是在无限温度场的时间常数；R是磁阻(磁导的倒数)；E是激活能量，常规为0.1至1eV。时间常数只有在软磁材料和仅仅在高频的时候才能显示其重要性。

不可逆的磁性粘滞度对于永磁体的稳定性是很重要的。不可逆的磁性粘滞度是由于热波动对磁化强度

或者对形成磁化强度的磁畴过程影响的结果。热搅动的效应是作为激活不可逆磁畴过程所需要的能量来考虑的。磁化强度的时间-温度间的相关性由下式给出：

$$M(t)=S\ln t \quad (3.14\text{-}4)$$

式中，$S=\lambda NM_skT$。这里 N 是单位体积的磁化强度为 M_s 的单元或区域的数量，并且 λ 是所有这些单元能量 E 的恒概率密度。因为这些因子都相对独立于温度（接近居里温度者除外），S 与 T 近似直接成正比。实验结果与这个公式相符。在室温里的时效，会造成许多材料的磁化强度损失。

设计依据

稳定性对于磁性材料的选用有着显著的影响，还对零件的形状和磁路的排列有影响。例如，对于与温度有关的取向硬磁铁氧体的矫顽力发生相当急剧的变化，则要求在设计上有专门的考虑。这时能使用的最低磁导率（B/H）是依据稳定性而不是磁路分析来确定的。

对于应用更为广泛的永磁材料，磁化强度的可逆性变化可通过低于室温的冷却予以实现。因为可逆性剩磁感应强度的变化可以用一条直线紧密地拟合，可逆性的温度系数列于磁学性质表里。温度系数值因材料而异。当其系数值非常小时，它们对于不同的磁体形状能有不同的标志。因此有可能通过磁体形状的精心设计使由温度而引起的剩磁感应强度变化非常小。加热到室温以上，可以有类似变化的结果。不可逆的损耗和可逆的变化之间的区分是很重要的。通用的做法是在磁体使用之前对在其使用过程中会遇到的极端温度之间进行循环试用。于是，几乎所有的不可逆损耗都能从一次温度的循环中遇到，但在某些情况里有必要进行四次或五次的循环。

在一些对磁化强度的变化极其敏感的应用里，非常常用的方法是采用温度补偿回路来抵消在整个工作温度范围里的可逆性变化。为此将具有温度敏感的铁-镍合金用于作为磁性分流器。将分流器安置在永磁体的一旁，当温度降低时，就便于将磁通量从空气间隙中转移开。借助于分流的温度补偿要求对磁体的进行保守设计，以利于磁通量损耗在低温下通过分流器。

在非常高温度中的暴露。让永磁体在接近永磁材料居里温度的温度里应用具有相当重要的意义。一般都认为各向异性的 Alnico 5 和 Alnico 6 能在 500～700℃（930～1290℉）的温度中使用。在这些温度里存在着冶金学效应以及不可逆和可逆的温度效应。Alnico 5 在 700℃（1290℉）的温度中暴露 20h 就能使 $(BH)_{最大}$ 和 H_c 减小到它们初始值的一半左右。故有可能通过设计将这种变化赋予设备和装置，而使永磁体在极端温度下及一定的时间内仍能发挥作用。

应力影响。某些在压缩过程中承受拉力的磁体会在其性能上表现出很大的变化。对于维卡钒钴铁磁性合金（Vicalloy）和铜镍铁永磁合金（Cunife），尤其是这样的。其变化甚至常在发生相当大变形后仍是可逆的。这种变化是由于应力对于系统总体上的各向异性所起的作用。

应用前的磁化。磁体可以在由直流或脉冲电磁体所提供的作用磁场中进行磁化。建议在实际中使用饱和磁化磁场，以使磁性潜能得到充分利用。大多数的磁体都能通过加热至居里温度或作用一个交流或直流磁场，使测量得到的磁感应强度降低到零，以此实现退磁。但是像 Alnico 和钐钴不能通过在其居里温度中的暴露而退磁，因为其金相方面的一些变化，会改变其永磁体的性质。

精选参考文献

- J.W. Fiepke, Permanent Magnet Materials, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 782–803.
- M. McCaig and A.E. Clegg, *Permanent Magnets in Theory and Practice,* Halsted Press, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1987.
- L. Moskowitz, *Permanent Magnet Design and Application Handbook,* Cahners, 1976.

第3节　超导材料

超导体是一种当温度降低到临界温度（T_c）之下时电阻会完全消失的材料。所有目前已知超导体的临界温度均大大低于室温，而且它们都要用液态气体（氦或氮）进行冷却，并要在或者低于大气压中进行保持。超导材料还必须有完好的抗磁性，也就是应用的磁场被完全排除出超导体。超导性能使发电机和电力输送线的能力超过目前所可能有的许多倍。它还能用于开发高速的悬浮运输系统，并且为在可控热核聚变中实现电离气体封闭所需要的大型磁场提供一种经济且可行的方法。

基本原理

从一种超导体到另一种超导体其临界温度都是不相同的，对金属和合金大约介于 1～20K 之间。较为新近所开发的陶瓷超导体具有超过 100K 的临界温度。在低于 T_c 温度下，超导状态将停留在具有足够大磁场强度的作用上，称之为临界磁场强度 H_c，它

取决于温度，并随温度的提高而减小。对电流密度同样存在着一个临界作用电流密度 J_c，当小于它，材料就是超导的。图 3.14-17 展示了这三个参数相互作用的关系。图 3.14-17 中处于 $T_cH_cJ_c$ 的包络边界以内的材料将是超导的，边界以外的都处于常规电导性。

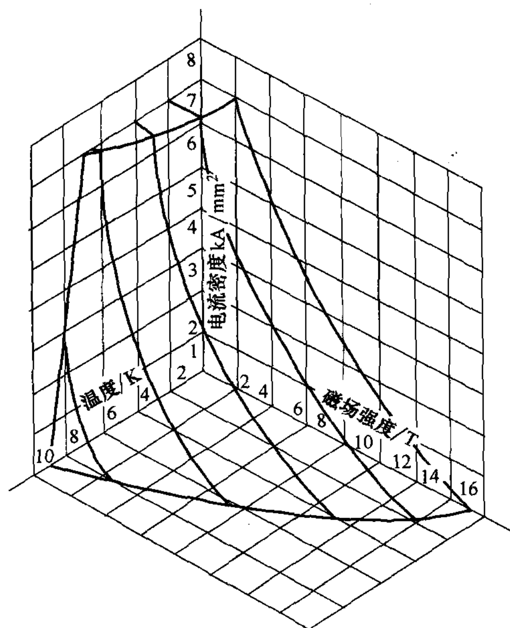


图 3.14-17　临界的温度、电流密度和磁场强度构成超导和常规导电之间的界限。 铌钛超导合金的这些数据是在 4.2K 的温度下测量的

根据磁响应特性，超导材料可以分成代号为类型Ⅰ和类型Ⅱ的两大类。当类型Ⅰ材料处于超导状态时是完全抗磁性体，即所有的作用磁场都被排除在材料的体外。所谓的迈斯纳效应（Meissner effect）的这种现象如图 3.14-18 所示。随 H 增加，材料在达到临界磁场强度 H_c 以前，一直维持着抗磁性。在 H_c 点则处于常规导电状态，并发生磁通量的完全穿透。包括铝、铅、锡和汞的多种金属元素都属于类型Ⅰ组。

类型Ⅱ超导体是在低磁场强度作用下的完全抗磁性体，磁场排除是完全的。然而，在较低和较高的临界磁场强度之间，从超导状态到常规导电状态的转变是渐变的，它们的代号分别为 H_{c1} 和 H_{c2}。磁通线在 H_{c1} 开始穿透进入材料体，并随着作用磁场强度的增加而延续，然后在 H_{c2} 作用磁场完全穿透。对 H_{c1} 和 H_{c2} 之间的磁场强度，材料以一种名为“混合状态”而存在——超导率处于混合状态直到 H_{c2}，高过它材料就成为常规导电体。对于大部分的实际应用而言，类型Ⅱ超导体由于其较高的临界温度和临界磁场强度而优于类型Ⅰ。表 3.14-7 比较了各种不同的类型Ⅰ和Ⅱ的超导材料性质。

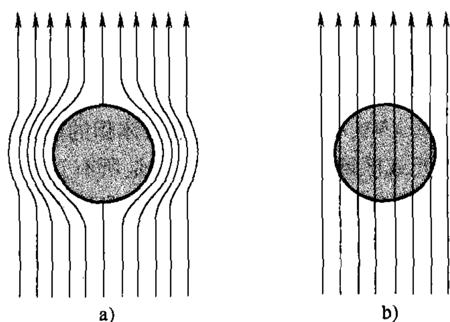


图 3.14-18　迈斯纳效应示意图
a）当处于超导阶段，材料体（阴影圆）从内部排除磁场（箭头）　b）一旦变成常规导电体，磁场便穿透同一材料体

超导体种类

已从好几百种的材料中观察到超导性。其中包括一半以上的金属元素和很大范围的合金和化合物（类型Ⅱ超导体）。然而到现在为止，最受重视的材料还是铌-钛超导体（即使用最广的超导体）、A15 化合物（重要的有序金属间化合物 Nb_3Sn 就属于这一类）、三元硫属化钼（谢夫尔相，Chevrel phase）以及高 T_c 陶瓷超导体。图 3.14-19 比较了金属和陶瓷超导材料的临界温度。T_c 较高陶瓷的优势是它们能用液氮冷却，液氮远比液氦便宜和储量丰富（后者用于金属超导体的冷却介质）。但是陶瓷超导体的脆性限制了这种材料被制造成形为如线材的能力。超导体的研究目标是开发出既可制造又能用常规冷冻设备进行冷却的或具有室温功能的超导体。

铌-钛超导体。 它实际上是一种由铌-钛丝（直径 $<10\mu m$）镶嵌在塑性基体（稳定剂）中的复合线材，这种基体必须能提供高电导率和热导率、高热容量以及在低温下的良好机械强度。高纯度的无氧铜（C10100）能满足所有这些要求，并且是最常用的稳定化基体材料。也有使用工业纯铝（合金 1100，99.0% Al）和铜-镍合金（通常浓度为 90:10 或 70:30）基体的。应用最广的丝合金是 Nb-46.5Ti。含量为 45%~50% Ti 的二元铌-钛超导体的 T_c 值为 9.0~9.3K。含有少至 1 根到多至 25000 根丝的复合导体已借助先进的挤制和拉丝技术制造出来。铌-钛超导体的重要应用包括医院使用的核磁共振影像装置（MRI）中的磁体、高能物理脉冲加速器的磁体应用（粒子加速器）以及用于热核聚变反应的磁约束高能等离子体。

表 3.14-7　所选的超导材料的近似超导性质

材　料	类　型	临界温度 T_c(在0T时)	参数(当4.2K时)			
			热力学临界磁场强度 T			临界电流密度
			$\mu_0 H_c$	$\mu_0 H_{c1}$	$\mu_0 H_{c2}$	$(J_c)/(kA/mm^2)$
Pb	I	7.3	0.0803①	—	—	—
Nb	II	9.3	0.37	0.25	0.41	—
Nb45-50-Ti	II	8.9～9.3	0.16	0.009	10.5～11.0	3(在5T时)
Nb_3Sn	II	18	0.46	0.034	19～25	10(在5T时)
Nb_3Ge	II	23	0.16	0.004	36～41	10(在5T时)
NbN	II	16～18	0.16	0.004	20～35	10(在5T时)
$PbMo_6S_8$	II	14～15	0.4	0.005	40～55	0.8(在5T时)
$YBa_2Cu_3O_7$	II	92	0.5	0.05②	60②	1(在77K,0T时)④
			0.03	0.01③	>200③	

①当0K时，为热力学的临界磁场强度。　②平行于 c 轴的磁场进行测量。　③平行于 a-b 平面的磁场进行测量。　④外延薄膜，电流处于 a-b 平面。

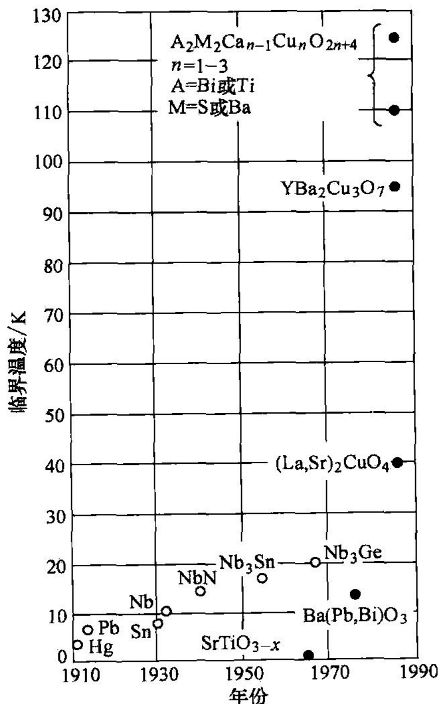


图 3.14-19　不同超导材料的临界温度及其开发的年份。空心圆点为金属超导体，实心的为陶瓷超导体

A15 超导体。(A15 时指 Strukturbericht 系统中的立方晶体类型)这是一种化学分子式为 A_3B 的金属间化合物，A 是一种过渡金属，B 可以是过渡金属或非过渡元素。在已知的76种 A15 化合物中，有46种已经知道是超导的。重要的例子包括 Nb_3Ge(T_c = 23K)、Nb_3Ga(T_c = 20.3K)、Nb_3Al(T_c = 18.9K)、Nb_3Sn(T_c = 18.3K)、V_3Si(T_c = 17.1K)和 V_3Ga(T_c = 15.4K)。由于易于制造，Nb_3Sn 是商业上最重要的 A15 化合物。如同铌-钛超导体一样绞合成多股细丝的线材，再以各种不同的技术镶嵌到铜稳定化的基体中(见图 3.14-20)。还要利用防扩散隔膜(铌、钽或钒)来防止在高温处理过程中基体与细丝之间发生的反应。Nb_3Sn 基超导体的应用包括大型螺线管磁体、

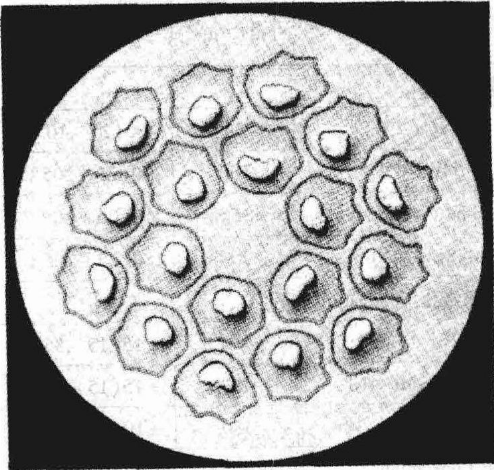


图 3.14-20　多股细丝 Nb_3Sn 超导线材的横截面(直径 20mm 或 0.78in)。其中有18根细丝，分别都有由铌围着钒的同心圆组成的双金属防扩散隔膜。细丝周围的基体为铜。75×

交流马达、发电机、动力输送电缆以及高能物理和核聚变反应技术上的应用。

三元硫属化钼。它代表很大一类用 $M_xMo_6X_8$ 通用分子式所表示的材料。式中 M 是正离子，X 是硫属元素(硫、硒或碲)。对于这种材料的大多数研究都集中在 $PbMo_6S_8$(PMS)和 $SnMo_6S_8$(SMS)，前者的 T_c 为 14 ~ 15K。PMS 或 SMS 线材都镶嵌在铜或钼的基体中。铜基体中采用铌扩散层。

高温超导体。(T_c 值超过 90K)它们是用于线、带和薄膜形式的陶瓷氧化物。其系统经过广为研究，包括 Y-Ba-Cu-O(最引人注目的 $YBa_2Cu_3O_7$，其 T_c = 92K)，Bi-Sr-Ca-Cu-O(T_c = 110K)和 Tl-Ba-Ca-Cu-O(T_c > 120K)。用于线和带形的氧化物基超导体的生产都是通过在一个银管里压实粉末，然后通过挤压或拉拔成为一条线，或根据需要轧制成为一条带。

精选参考文献

- R.B. Poeppel, et al., High Temperature Superconductors, *Ceramics and Glasses*, Vol 4, *Engineered Materials Handbook*, ASM International, 1991.
- *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 1030–1042 (principles of superconductivity), 1043–1059 (niobium-titanium superconductors), 1060–1076 (A15 superconductors), 1077–1080 (ternary molybdenum chalcogenides), 1081–1084 (thin films), and 1085–1089 (high-temperature superconductors).
- A.C. Rose-Innes and F.H. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, 1969.
- *Superconductor Materials Science: Metallurgy, Fabrication and Applications*, S. Foner and B.B. Schwartz, Ed., Plenum Press, 1981.
- M.N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Oxford University Press, 1983.

第4节　电阻合金

电阻合金包括用于仪器和控制设备中测量和调节电学特征和用于炉子和生活电器中产生热量的两大类型。在前者用途中，主要关注的是其在接近周围环境温度中的性质，而后者最为重要的是高温特性。在普通的商业用术语中，用于控制和调节电学性质的电阻合金称为电阻合金，而用于产生热的电阻合金则称为加热合金。还有第三种电阻材料就是用于使产生的热能转变为机械能的电阻器里，称为双金属。

电阻合金

电阻合金的主要要求就是均匀一致的电阻率、稳定的电阻(无与时间相关的时效效应)、电阻的重现温度系数以及相对于铜的低热电势。第二位重要的性质是线膨胀系数、机械强度、塑性、耐腐蚀性以及通过软、硬钎焊及弧焊与其他金属的连接能力。还有其可获得性和成本也是因素。

表 3.14-8 列出的是仪器和控制电阻器里的电阻器所用金属和合金的名义成分和物理性质。

表 3.14-8　电阻合金的一般性能

基本成分(质量分数,%)	电阻率[1]/(nΩ·m[2])	TCR/(ppm/℃[3])	相对于Cu的热电势/(μV/℃)	线膨胀系数[4]/[μm/(m·℃)]	抗拉强度[1]		密度[1]	
					MPa	ksi	g/cm³	lb/cm³
无线电合金								
98Cu-2Ni	50	1400(25 ~ 105℃)	-13(25 ~ 105℃)	16.5	205 ~ 410	30 ~ 60	8.9	0.32
94Cu-6Ni	100	700(25 ~ 105℃)	-13(25 ~ 105℃)	16.3	240 ~ 585	35 ~ 85	8.9	0.32
89Cu-11Ni	150	450(25 ~ 105℃)	-25(25 ~ 105℃)	16.1	240 ~ 515	35 ~ 75	8.9	0.32
78Cu-22Ni	300	180(25 ~ 105℃)	-36(0 ~ 75℃)	15.9	345 ~ 690	50-100	8.9	0.32
锰镍铜合金(Manganins)								
87Cu-13Mn	480	±15(15 ~ 35℃)	-1(0 ~ 50℃)	18.7	275 ~ 620	40 ~ 90	8.2	0.30
83Cu-13Mn-4Ni	480	±15(15 ~ 35℃)	-1(0 ~ 50℃)	18.7	275 ~ 620	40 ~ 90	8.4	0.31
85Cu-10Mn-4Ni[5]	380	±10(40 ~ 60℃)	-1.5(0 ~ 50℃)	18.7	345 ~ 690	50 ~ 100	8.4	0.31
康铜(Constantans)								
57Cu-43Ni	500	±20(25 ~ 105℃)	-43(25 ~ 105℃)	14.9	410 ~ 930	60 ~ 135	8.9	0.32
55Cu-45Ni	500	±40(-55 ~ 105℃)	-42(0 ~ 75℃)	14.9	455 ~ 860	66 ~ 125	8.9	0.32
53Cu-44Ni-3Mn	525	±70(-55 ~ 105℃)	-38(0 ~ 100℃)	14.9	410 ~ 930	60 ~ 135	8.9	0.32

（续）

基本成分（质量分数，%）	电阻率[1]/（nΩ·m[2]）	TCR/（ppm/℃[3]）	相对于Cu的热电势/（μV/℃）	线膨胀系数[4]/[μm/（m·℃）]	抗拉强度[1]		密度[1]	
					MPa	ksi	g/cm³	lb/cm³
Ni-Cr-Al								
75Ni-20Cr-3Al-2（Cu，Fe或Mn）	1333	±20（-55~105℃）	1.0（25~105℃）	12.6	825~1380	120~200	8.1	0.29
72Ni-20Cr-3Al-5Mn	1375	±20（-55~105℃）	1.0（25~105℃）	13	690~1380	100~200	7.1	0.26
镍基合金								
78.5Ni-20Cr-1.5Si	1080	80（25~105℃）	3.9（25~105℃）	13.5	790~1380	115~200	8.3	0.30
76Ni-17Cr-4Si-3Mn	1330	±20（-55~105℃）	-1（20~100℃）	15	900~1380	130~200	7.8	0.28
71Ni-29Fe	208	4300（25~105℃）	-40（25~105℃）	15	480~1035	70~150	8.4	0.31
68.5Ni-30Cr-1.5Si	1187	90（25~105℃）	-1.2（25~105℃）	12.2	825~1380	120~200	8.1	0.29
60Ni-16Cr-22.5Fe-1.5Si	1125	150（25~105℃）	0.9（25~105℃）	13.5	725~1345	105~195	8.4	0.30
37Ni-21Cr-40Fe-2Si	1080	300（20~100℃）	—	16.0	585~1135	85~165	7.96	0.288
35-Ni-20Cr-43.5Fe-1.5Si	1000	400（25~105℃）	-1.1（25~105℃）	15.6	585~1135	85~165	8.1	0.29
Fe-Cr-Al								
73.5Fe-22Cr-4.5Al	1350	60（25~105℃）	-3.0（0~100℃）	11	690~965	100~140	7.25	0.262
73Fe-22Cr-5Al	1390	40（25~105℃）	-2.8（0~100℃）	11	690~965	100~140	7.15	0.258
72.5Fe-22Cr-5.5Al	1450	20（25~105℃）	-2.6（0~100℃）	11	690-965	100~140	7.1	0.256
81Fe-15Cr-4Al	1250	±50（25~105℃）	-1.2（0~100℃）	11	620~900	90~130	7.43	0.268
纯金属								
铝（99.99+）	26.55	4290[1]	-3.4（0~50℃）	23.9[1]	50~110	7~16	2.70	0.098
铜（99.99）	16.73	4270（0~50℃）	0	16.5[1]	115~130	17~19	8.96	0.324
金（99.999+）	23.50	4000（0~100℃）	0.2（0~100℃）	14.2[1]	130	19	19.32	0.698
铁（99.94）	970	5000[1]	12.2（0~100℃）	11.7[1]	180~220	26~32	7.87	0.284
钼（99.9）	52	3300[1]	6.9（0~100℃）	4.9	690~2140	100~310	10.22	0.369
镍（99.8）	80	6000（20~35℃）	-22（0~75℃）	15	345~760	50~110	8.90	0.322
铂（99.99+）	105	3920（0~100℃）	7.6（0~100℃）	8.9[1]	125	18	21.45	0.775
银（99.99）	16	4100[1]	-0.2（0~100℃）	19.7	125	18	10.49	0.379
钽（99.96）	125	3820（0~100℃）	-4.3（0~100℃）	6.5[1]	690~1240	100~180	16.6	0.600
钨（99.9）	55	4500[1]	3.6（0~100℃）	4.3[1]	1825~4050	265~590	19.25	0.695

①在20℃（68℉）。　②乘以0.6015g转化为Ω·圆密耳/ft（"圆密耳"即直径为1mil的圆的面积——译者注）。　③电阻的温度系数是$(R-R_0)/R_0(t-t_0)$，其中R为t℃时的电阻和R_0是在参照温度t_0℃的温度。　④在25~105℃。　⑤分流锰铜。

电阻合金必须要有足够的塑性，才能拉制成直径细至0.01mm（0.0004in）的线材或轧制成宽度从0.4~50mm（1/64~2in）、厚度从0.025~3.8mm（0.001~0.15in）的窄带。

合金还必须有足够的强度承受加工工序，并且易于制成为一种具有可持续再现性质的合金。例如接连批量生产的线材必须具有非常相似的电学特性：如果其性质一批与一批不一样，则用不同批次生产的线材

制造的电阻器，将导致同样规格型号的仪器在相同再现性条件下显示出很大的性能差异，或者某一规格型号的仪器由于使用了不同批次生产的电阻器作为其更换配件而造成很大的误差。

还必须考虑由其缠绕的电阻器和绝缘物的膨胀系数，因为形成的应力会使电阻及其温度系数发生改变。同样重要的是要在选用单层和多层缠绕的电阻器之间进行分析，因为这两种型式的散热比是不一样的。

在精度非常高的原始电学标准器的设计中，不必顾虑所用电阻材料的成本。但是普通生产的器件成本将是材料选用的一个决定性因素。

电阻器

电器和电子装置用的电阻器，根据其允许误差可分为独立的两大类：用于总体误差小于1%的精密仪器的和较差精密度的。用于特定电阻器用途的合金选择取决于性能允差上的差别。

在许多电子装置中，电阻值误差从5%~10%的电阻器是完全能满足需要的。这一类中的大部分电阻器都是用碳制成。碳电阻器不属于本文的讨论范围。本章关注的主要是金属电阻器如金属丝缠绕的精密电阻器和电位计、电阻温度计以及镇流电阻。

电阻材料的某些用途是一些要求具有正的或负的大热电阻系数的装置。这类装置称为热变电阻器（热敏电阻）。热变电阻器几乎只用陶瓷半导体材料制造。

精密电阻器。这种（指误差小于1%的）电阻器要求精心选择材料。用于精密电阻器的理想材料在其全部工作温度范围里的热电阻系数应当都等于零。此外，为保证无热电效应，它应当有相对于铜的小或可忽略的热电势，而铜是通常用于连接导体的材料。在电阻丝与连接线之间的各种接头里都存在着温度差，这就会形成一种热电偶电路网络，并在其电路中产生附加电动势，这种效应在精密直流（dc）电路里尤为关键。在一个要求极其精密的设备里连接线最好都采用与电阻器相同的材料制成，或者将设备设计成为所有不相似金属的接头都处于相同的工作温度。

作为一种精密电阻器的材料选择和尺寸确定，必须包括对设备大小和散热特征的分析。一般都不允许温度从周边温度或规定工作温度上发生漂移，因为这会造成电阻的净变化，从而将影响仪器的稳定性或准确度。利用电阻的温度系数可以计算电阻值变化的幅度。例如，一种用低电阻率材料制造的电阻器，为得到相同的总电阻需比用高电阻率材料制造的电阻器大许多倍。大的电阻器会有较大的表面积，而散发更多的热量，因此尽管其电阻率低，但还是有可能达到比在同样条件下工作的高电阻率的小电阻器更低的稳态温度。用于精密电阻器的合金一般有范围从500~1350nΩ·m（300~800Ω·圆密耳/ft）的电阻率。

电阻温度计。电阻温度计一般是用铜、镍或铂制造的，这些装置也是精密电阻器，其电阻随温度变化的稳定性和重现性覆盖其规定的全部温度范围。对于电阻温度计，材料的温度系数越高，精度也越高并测量得也越容易。少量杂质也会对相对纯净材料的温度系数造成很大的影响。事实上，作为金属纯度最灵敏的测试方法之一，也就是对其电阻率温度系数的测量，而此温度系数随杂质和合金含量的增加而急剧减小。

镇流电阻器。它们广泛地在工业电路上用于使电流在很长的时期内保持不变。在这种用途里，镇流电阻器必须能够以一种在很大电压范围里控制电流的方式来散发能量。具有适当电阻温度系数的线材可以制造成使其电阻能迅速地随电流的变化而变化，由于自我加热以一种无论电路里所施加的电压如何波动而使电路里的电流维持大致不变的方式进行变化。因为镇流电阻器是在高温下运行的，其力学性能也很重要。用于镇流电阻器的典型材料有纯铁、纯镍和镍-铁合金如71Ni-29Fe（表3.14-8）。

参考电阻器。实际上它们与所有其他电阻合金的应用都要求电阻的温度系数低于±20ppm/℃（±20μΩ/Ω·℃）。这个要求的提出是由于对于这些用途而言，由周边连续发生的温度小变化所造成的电阻误差也会超出其允差。在这些用途里的最大要求就是，常要将电阻器安装在绝热的容器中，并且一旦温度稍微超过周边的最高预定温度，就要进行精心维护。

作为参考标准使用的电阻器的最重要的要求是，其数值能在很长的时期内并在窄小的极限范围里可以被预估。许多参考电阻器的电阻与时间都能表现近似的线性关系。因此，在标定日期以内的电阻可以用内插法确定，超出时间点的电阻也可以用外插法进行确定，但是对外插法确定值不应该过于信赖，图3.14-21所示是用Ni-Cr-Al-Cu合金制成的10kΩ电阻器的电阻随时间的变化。

稳定性。或者说是一种能在相当长的时间内使规定电阻保持在窄小的极限值范围之内，对于精密电阻器和参考电阻器这是材料的一个重要要求。造成不稳定的主要因素是：①残余应力在使用过程中的释放；②与时间相关或与时间-温度相关的金相变化，如二次相的析出；③腐蚀或氧化；④潮湿。

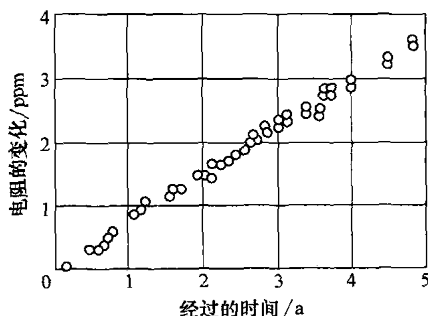


图3.14-21　一个10kΩ电阻器的电阻随时间的变化。

残余应力在室温里经过一个很长时期的所谓应力松弛过程而得到释放。应力的松弛会以一种变化的速率改变线圈的电阻，这种速率随其初始残余应力的幅度增大而提高。为此，只有经过仔细的预退火的线材，才可以用于精密电阻器。经过预退火的线材在缠绕、编织或电阻器的其他加工工序中产生的应力，必须保持在最低限度。加工成品电阻器并不一定都能够再进行整体退火，因为这时线材已经用仅能耐温热的包漆或织物绝缘涂层的包覆。不论何种包覆层，用于加工成品电阻器所能承受的应力释放的极限温度约为140℃(285℉)。

图3.14-22所示是残余应力对于经过不同程度冷变形加工的锰铜稳定性的影响。最上面的曲线表示一种低温应力释放处理所实际消除了正好由在室温下天然松弛可能已消除的应力。

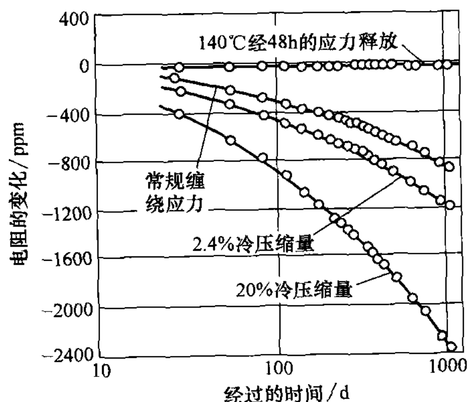


图3.14-22　室温时效时间与锰铜电阻器的电阻变化的关系。

由最上面的曲线所代表的是电阻器在140℃(285℉)经48h所释放的应力，以此使它们的电阻稳定于标称值的大约20ppm之内。由其他曲线所表示的未经应力释放的电阻器的电阻，几乎要无限期地连续变化下去。作为最新开发的密闭型的精密电阻器经140℃(285℉)的退火，其电阻的变化将不会超过10ppm/a，而且其中许多都不会超过5ppm/a。然而用锰铜制造的电阻器作为参考标准器使用，需要更高的稳定性，140℃(285℉)的应力释放还是不够的。最高等级的1Ω的电阻器(双壁型的)要按下面的方法处理。一个线圈绕在钢的心轴上，并在约500℃(930℉)的保护气氛中退火6h甚至更长。然后将线圈取下并作为心轴套滑在相同直径的绝缘管上，再用直径稍大的第二根管子进行密闭。大多数这类电阻器的电阻的变化不超过1ppm/a。

影响精密电阻器稳定性的第二个因素是作为电阻元件使用的合金的金相组织稳定性，任何金相组织变化都是有害的。所有的电阻合金都是单相的固熔合金，因此发生的电阻变化都相对较小，但并非无关紧要。电阻的变化都是由内部变化造成的，如71Ni-29Fe合金中长程有序-无序反应、四元镍铬合金中的短程有序或聚集成团以及锰铜合金中更小的有序。于是，这些合金电阻受热处理和由热处理温度冷却的速率所影响。能在高达300℃(570℉)的温度中工作的动力电阻器可以在使用过程中进行有效的热处理。在使用过程中的净效果可以是镍铬合金的电阻增大、锰铜的电阻减小以及镍-铁合金的电阻增大或减小。

影响电阻器稳定性的第三种因素是腐蚀和/或氧化。电阻元件的腐蚀将减小其有效横截面，并造成电阻的相应增加。如果腐蚀是可选性的，则电阻的温度系数、热电动势(emf)和电阻率都要发生变化。利用包漆或塑料涂层对线材进行保护可以将这些腐蚀的影响降低到最低限度。一种相对普通的、但常被忽视的腐蚀源就是软钎焊或硬钎焊接头上的残留焊剂。另一种较不为人注意的不稳定因素就是含锡软钎焊料的存在。相信在热应力释放处理过程中发生的晶间应力腐蚀会造成电路的断开。

影响漆包线缠绕的电阻器稳定性的第四种因素是湿度。电阻的变化取决于漆膜的厚度、线的直径以及电阻器所处的潮湿变化。增加某一电阻器的潮湿将会造成电阻的正向改变，而减小潮湿则造成负向偏移。通过电阻器的密闭，完全有可能将这种影响因素予以排除。

以上四种因素——残余应力、金相组织不稳定性、腐蚀或氧化性及湿度——的组合，常导致电阻器的电阻发生的复杂变化。

软钎焊可焊性或连接性。合金进行软钎焊、硬钎焊或熔焊的容易程度是为精密电阻器选择材料的一个需考虑的重要问题。不适当的软钎焊或硬钎焊的连接常会造成电路里电阻的不稳定性。需要软钎焊的金属在上锡之前，必须清洁，这样焊料才能完全润湿其表

面并保持电流的连续性。对于铜-镍合金这是比较简单的，因为这种合金表面上不会生成保护性氧化物涂层。而镍-铬合金清洁后必须在保护性氧化物自然形成之前立即进行上锡。

电阻的压力系数。如果作用于电阻元件的静压发生变化，那么电阻器的电阻值也随之而变；对于锰铜，这种变化大约为 23pΩ/Ω · Pa(0.16pΩ/Ω · psi)。密封的电阻器也会受外部压力变化的影响。例如在一个双管壁 1Ω 的电阻器中，作用于内管的压力变化将会造成管径的变化，从而改变缠绕在管子上线的长度。电阻变化的幅度部分地取决于壁厚，而且对于商用电阻器一般都小于锰铜的静压系数(PCR)。未经密封的、缠绕于含空气气泡云母片上的电阻器所具有的压力系数比用其合金的静压系数所预测的压力系数要大好多倍。这种影响只有当有很大的压力变化时才显得重要，而且只有当海平面以上的高度有很大的变化时，上述压力变化才是最有可能的。

双金属

双金属是一种复合材料(通常以薄板或带的形式)，它由两种或多种的材料粘结在一起，其中一种可以是非金属。因为构成复合体而粘结在一起的材料具有不同的热膨胀性，复合体的曲率会因为温度的变化而改变：这就是任何一种双金属的基本特征。因此双金属就是一种以控制、指示或监测为目的、能够将热能直接转化成机械能的完整自主传感系统。

在如电路断路器、热继电器、马达过载保护器和闪光器的一些应用里，是由于电流从元件通过，从而使其产生促使元件动作所必需的温度变化——换而言之，就是由于 I^2R 的加热而形成负载。在某些其他用途里，因 I^2R 加热而引起温控元件的任何温度升高都是不合适的，故要求双金属为低电阻率。

作为电路断路器及类似的装置，其双金属具有不同的电阻率而有相似的其他性质。这就使制造商能将电路断路器设计成具有不同额定值的完整系列，它们的温控元件具有相同的尺寸而不同的电阻。其电阻率的变化取决于处在另外两种具有高电阻率并很不相同的线膨胀系数的外层金属之间的一层低电阻率金属中间层。

在一种 24℃(75℉)的电阻率范围为 165 ~ 780 nΩ · m(100 ~ 470Ω · 圆密耳/ft)的工业用双金属系列里，高纯度镍用于作为中间层。而在电阻率范围为 33 ~ 165nΩ · m(20 ~ 100Ω · 圆密耳/ft)的系列里，高电导率的铜合金用于作为中间层。

将电阻率为 1745nΩ · m(1050Ω · 圆密耳/ft)的 Mn-Cu-Ni 合金，用于作为外层中的一层则能使双金属的实际电阻率上限延伸到 24℃时的 1620nΩ · m (975Ω · 圆密耳/ft)。

在标准温度下的电阻率允差介于 ±3%~ ±10%之间，取决于双金属的种类及其电阻率。

大约有 30 种不同的合金可用于制造 50 种以上的不同双金属。这 30 种合金大部分为镍-铁、镍-铬铁和高锰合金。

双金属可以是厚度为 0.13 ~ 3.2mm (0.005 ~ 0.125in)和宽度为 0.5 ~ 300mm(0.020 ~ 12in)的带材或薄板。它们都易于成形加工为所需要的形状。双金属通常是根据其介于 -185 ~ +540℃(-300 ~ +1000℉)的不同工作温度范围来选用的。表 3.14-9 列出了几种温度范围的性质和典型的双金属片组合。

表 3.14-9 在常用温度下常选用的双金属的性质

最大敏感度的温度范围		成分		24℃(75℉)时的电阻率		挠度①	
℃	℉	高膨胀一侧	低膨胀一侧	nΩ · m	Ω · 圆密耳/ft	μm/(m · ℃)	μin/(in · ℉)
-20 ~ 150	0 ~ 300	75Fe-22Ni-3Cr	64Fe-36Ni	780	470	26.3	14.6
-20 ~ 200	0 ~ 400	75Fe-22Ni-3Cr	纯 Ni	160	95	8.3	4.6
		72Mn-18Cu-10Ni	64Fe-36Ni	1120	675	38.5	21.4
120 ~ 290	250 ~ 550	67Ni-30Cu-1AFe-1Mn	60Fe-40Ni	565	340	16.6	9.2
150 ~ 450	300 ~ 850	66.5Fe-22Ni-8.5Cr	50Fe-50Ni	580	350	11.2	6.2

①在 40 ~ 50℃(100 ~ 300℉)。见用于测定双金属挠度的 ASTM B106 标准方法。

加热合金

电阻加热合金应用于许多不同用途里——从小型家用生活电器到大型工业工艺加热系统和炉子。在生活电器或工业工艺加热设备中加热元件通常为以下两种之一：带有陶瓷套管并安装于适当金

属框架上的敞开式电阻丝螺旋线圈；或者由较小直径电阻丝螺旋线圈构成的带有密闭金属护套的加热元件，并利用压实的耐熔绝缘层将电阻丝与电阻金属护套绝缘。作为工业用炉，其加热元件常必须能连续运行在高达1300℃(2350℉)温度的金属处理工业炉、1700℃(3100℉)温度的陶瓷烧烤窑以及偶尔达到2000℃(3600℉)或更高温度的特种用途的炉子里面。

应用于加热元件的材料的主要要求是高熔点、高电阻率、电阻的重现温度系数、良好的耐氧化性、无挥发性组分以及耐污染性。其他所要求的性质还有良好的高温蠕变强度、高热辐射系数、低热膨胀和低弹性模量(这两者有助于将热疲劳性降低到最低限度)、良好的耐热冲击性以及在其加工温度下有良好的强度和塑性。

表3.14-10列出它们的物理和力学性能，而表3.14-11列出作为炉内使用的加热材料所推荐的最高工作温度。在这些表中所列的四组材料中的第一组(Ni-Cr和Ni-Cr-Fe合金)所应用的用途数量远多于其他的。

表3.14-10　电阻加热材料的典型性能

基本成分	电阻率①/(nΩ·m②)	电阻平均变化③(%)从20℃至:				线膨胀系数/[μm/(m·℃)]，从20℃至:			抗拉强度		密度	
		260℃	540℃	815℃	1095℃	100℃	540℃	815℃	MPa	ksi	g/cm³	lb/in³
Ni-Cr和Ni-Cr-Fe合金												
78.5Ni-20Cr-1.5Si(80-20)	1080	4.5	7.0	6.3	7.6	13.5	15.1	17.6	655~1380	95~200	8.41	0.30
77.5Ni-20Cr-1.5Si-1Nb	1080	4.6	7.0	6.4	7.8	13.5	15.1	17.6	655~1380	95~200	8.41	0.30
68.5Ni-30Cr-1.5Si(70-30)	1180	2.1	4.8	7.6	9.8	12.2	—	—	825~1380	120~200	8.12	0.29
68Ni-20Cr-8.5Fe-2Si	1165	3.9	6.7	6.0	7.1	—	12.6	—	895~1240	130~180	8.33	0.30
60Ni-16Cr-22Fe-1.5Si	1120	3.6	6.5	7.6	10.2	13.5	15.1	17.6	655~1205	95~175	8.25	0.30
37Ni-21CrFe-2Si	1080	7.0	15.0	20.0	23.0	14.4	16.5	18.6	585~1135	85~165	7.96	0.288
35Ni-20Cr-43Fe-1.5Si	1000	8.0	15.4	20.6	23.5	15.7	15.7	—	550~1205	80~175	7.95	0.287
35Ni-20Cr-42.5Fe-1.5Si-1Nb	1000	8.0	15.4	20.6	23.5	15.7	15.7	—	550~1205	80~175	7.95	0.287
Fe-Cr-Al合金												
83.5Fe-13Cr-3.25Al	1120	7.0	15.5	—	—	10.6	—	—	620~1035	90~150	7.30	0.26
81Fe-14.5Cr-4.25Al	1250	3.0	9.7	16.5	—	10.8	11.5	12.2	620~1170	90~170	7.28	0.26
73.5Fe-22Cr-4.5Al	1350	0.3	2.9	4.3	4.9	10.8	12.6	13.1	620~1035	90~150	7.15	0.26
72.5Fe-22Cr-5.5Al	1450	0.2	1.0	2.8	4.0	11.3	12.8	14.0	620~1035	90~150	7.10	0.26
纯金属												
钼	52	110	238	366	508	4.8	5.8	—	690~2160	100~313	10.2	0.369
铂	105	85	175	257	305	9.0	9.7	10.1	345	50	21.5	0.775
钽	125	82	169	243	317	6.5	6.6	—	345~1240	50~180	16.6	0.600
钨	55	91	244	396	550	4.3	4.6	4.6	3380~6480	490~940	19.3	0.697
非金属加热元件的材料												
碳化硅	995~1995	-33	-33	-28	-13	4.7	—	—	28	4	3.2	0.114
二硅化钼	370	105	222	375	523	9.2	—	—	185	27	6.24	0.225
$MoSi_2$+10%陶瓷添加剂	270	167	370	597	853	13.1	14.2	14.8	—	—	5.6	0.202
石墨	9100	-16	-18	-13	-8	1.3	—	—	1.8	0.26	1.6	0.057

①在20℃(68℉)。　②乘以0.6015转化为Ω·圆密耳/ft。　③根据冷却速率，电阻的变化有所改变。

表 3.14-11　电阻加热材料的推荐最高炉子工作温度

基本成分(质量分数,%)	近似熔点		空气中最高炉子工作温度	
	℃	℉	℃	℉
Ni-Cr 和 Ni-Cr-Fe 合金				
78.5Ni-20Cr-1.5Si(80-20)	1400	2550	1150	2100
77.5Ni-20Cr-1.5Si-1Nb	1390	2540	—	—
68.5Ni-30Cr-1.5Si(70-30)	1380	2520	1200	2200
68Ni-20Cr-8.5Fe-2Si	1390	2540	1150	2100
60Ni-16Cr-22Fe-1.5Si	1350	2460	1000	1850
35Ni-30Cr-33.5Fe-1.5Si	1400	2550	—	—
35Ni-20Cr-43Fe-1.5Si	1380	2515	925	1700
35Ni-20Cr-42.5Fe-1.5Si-1Nb	1380	2515	—	—
Fe-Cr-Al 合金				
83.5Fe-13Cr-3.25Al	1510	2750	1050	1920
81Fe-14.5Cr-4.25Al	1510	2750	—	—
19.5Fe-15Cr-5.2Al	1510	2750	1260	2300
Fe-Cr-Al 合金				
73.5Fe-22Cr-4.5Al	1510	2750	1280	2335
72.5Fe-22Cr-5.5Al	1510	2750	1375	2505
纯金属				
钼	2610	4730	400①	750①
铂	1770	3216	1500	2750
钽	3000	5400	500①	930①
钨	3400	6150	300①	570①
非金属加热元件材料				
碳化硅	2410	4370	1600	2900
二硅化钼	②	②	1700 ~ 1800	3100 ~ 3270
$MoSi_2$ +10% 陶瓷添加剂	②	②	1900	3450
石墨	3650 ~ 3700③	6610 ~ 6690③	400④	750④

①这些金属的推荐气氛为真空 10^{-4} ~ 10^{-5}mmHg、纯氢及部分燃烧的城市煤气，并使其干燥至露点为 4℃(40℉)。在这些气氛中推荐的温度为：

元素	真　空	纯 H_2	城市煤气
Mo	1650℃(3000℉)	1760℃(3200℉)	1700℃(3100℉)
Ta	2480℃(4500℉)	不推荐	不推荐
W	1650℃(3000℉)	2480℃(4500℉)	1700℃(3100℉)

②$MoSi_2$ 在 1740℃(3165℉)熔化之前分解，$MoSi_2$ +10% 陶瓷添加剂的分解为在 1825℃(3315℉)熔化之前。　③石墨在 3650 ~ 3700℃(6610 ~ 6690℉)挥发而不会熔化。　④在约 400℃(750℉)的温度(氧化的门槛温度)下，空气中的石墨会经受 24h 损失 1% 的重量。在惰性气氛里，石墨能在表面温度高达 2205℃(4000℉)温度里工作。

在第一组中，塑性的锻压合金所具有的性能使它们能在各种各样的环境的高温和低温中获得应用。Fe-Cr-Al 的成分组成(第二组)也是塑性合金。它们在温度范围较高的加热器中发挥着重要的作用，其构成也为元件提供更有效的力学支承。构成第三组的纯金属具有极高的熔点。除了铂以外，它们全都易于氧化，故只能限于在非氧化的环境中应用。其价值仅在有限的使用范围内，主要在 1370℃(2500℉)以上的温度里使用。铂的成本也大大限制其应用，只能用于一些小的特殊炉子里。

第四组即非金属加热元件材料还是能用于较高的温度里。碳化硅可以用于高达 1650℃(3000℉)的温度里，三种不同的二硅化钼能适用于空气中的最高温度分别为 1700℃、1800℃ 和 1900℃(3100℉、3270℉ 和 3450℉)。二硅化钼的加热元件日益为工业和实验室用的炉子所采用。在其所要求的性质中包括极佳的抗氧化性、长寿命、恒电阻值、自修复能力和抗热冲击性。所介绍的非金属加热元件与金属加热合金相比非常易碎。

电阻加热器的设计

无论选择何种加热合金，加热元件的设计都是很重要的。最重要的规则之一就是使其膨胀和收缩不受阻碍，以此防止因温度变化而引起的应力集中。

在 400 ~ 600℃(750 ~ 1100℉)的较低温度中，使用的成形加热元件用于烤箱。在这种结构里，加热器的支承是两根高合金圆棒，两者相隔约 300mm(12in)，安装于一个用角钢制成的框架上。圆棒的长度取决于额定输入功率，且上面带有线轴式绝缘子，以供加热合金制成的带状加热元件在其上面缠绕。在与之类似的另一种结构里，带形加热元件换成连续的五号或更小线型的螺旋线圈。

用于烤箱加热器窄带的尺寸范围厚度为0.09～0.20mm(0.0035～0.008in)和宽度为9.5～16mm(3/8～5/8in)。烤箱加热器是以约8kW/m²(5W/in²)的功率密度为其最大额定输入功率(通过加热元件的总输入功率除以加热器的总面积可以计算出功率密度)。作为120V或240V的在正常条件下使用的烤箱加热器，镍铬加热元件在空气中的寿命期望值为3～5年(根据其温度、气氛和循环条件)。

当炉温高达1175℃(2150℉)时，一般用宽厚比为从12:1且尺寸变化厚度为0.76～3.2mm(0.030～0.125in)、宽度为13～38mm(1/2～1 1/2in)的窄带通过成形制成波形回路的加热元件。电阻材料的缠绕的圆棒也可以制成加热元件。也有一些炉子的制造厂家使用圆棒形的加热元件。

气氛

根据元件的温度，表3.14-12以“好、尚可和不推荐”对不同的加热元件材料在其所指定的温度和气氛中的适用性进行评价。标准炉子气氛的种类和成分如表3.14-13所示。加热元件的温度总是要高于炉子的控制温度，两者的差别取决于加载于元件表面的功率密度。于是，当炉子在较为活性的气氛中接近最高加热元件温度里工作时，功率密度的加载应该比较低，而元件的横截面积应该比较大。

表3.14-12 在不同的炉子气氛中的加热元件材料的寿命比较

加热元件材料	相对寿命及其最高工作温度							
	氧化(空气)	还原：干 H_2 或类型501	还原：类型102或202	还原：类型301或402	渗碳：类型307或309	用硫还原或氧化	用铅或锌还原	真空
Ni-Cr和Ni-Cr-Fe合金								
80Ni-20Cr	好，至1150℃	好，至1175℃	尚可，至1150℃	尚可，至1000℃	不推荐①	不推荐	不推荐	好，至1150℃
60Ni-16Cr-22Fe	好，至1000℃	好，至1000℃	好至尚可，至1000℃	尚可至差，至925℃	不推荐	不推荐	不推荐	—
35Ni-20Cr-43Fe	好，至925℃	好，至925℃	好至尚可，至925℃	尚可至差，至870℃	不推荐	尚可，至925℃	尚可，至925℃	—
Fe-Cr-Al合金								
Fe，22Cr，5.8Al，1Co	好，至1400℃	尚可至差，至1150℃②	好，至1150℃②	尚可，至1050℃②	不推荐	尚可	不推荐	好，至1150℃
22Cr，5.3Al，余量Fe	好，至1400℃	尚可至差，至1050℃②	好，至1050℃②	尚可，至950℃②	不推荐	尚可	不推荐	好，至1050℃
纯金属								
钼	不推荐③	好，至1650℃	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	好，至1650℃
铂	好，至1400℃	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	—
钽	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	好，至2500℃
钨	不推荐	好，至2500℃④	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	好，至1650℃
非金属加热元件材料								
碳化硅	好，至1600℃	尚可至差，至1200℃	尚可，至1375℃	尚可，至1375℃	不推荐	好，至1375℃	好，至1375℃	不推荐
石墨	不推荐	尚可，至2500℃	不推荐	尚可，至2500℃	尚可至差，至2500℃	尚可，至2500℃还原	尚可，至2500℃	—
二硅化钼	好，至1850℃	1350℃	1600℃	1400℃	1350℃	—	—	—

注：气氛成分见表3.14-13。

氩或氦的惰性气氛适用于所有的材料。氮仅推荐用于镍铬组里，所列温度为元件温度而不是炉子温度。

①可以使用有陶瓷保护涂层的特种80Ni-20Cr元件，用于低压(8～6V)。 ②必须先氧化。 ③可以在氧化气氛中使用有 $MoSi_2$ 涂层的特种钼加热元件。 ④仅在纯 H_2 中为好。

表3.14-13　标准炉内气氛的典型成分(在这些气氛中的加热元件的相对寿命见表3.14-12)

型号	描述	成分(体积分数,%)					典型露点		型号	描述	成分(体积分数,%)					典型露点	
		N_2	CO	CO_2	H_2	CH_4	℃	℉			N_2	CO	CO_2	H_2	CH_4	℃	℉
还原气氛									还原气氛								
102[①]	发热未经提纯的	71.5	10.5	5.0	12.5	0.5	27	80	501	游离氨	25	—	—	75	—	-51	-60
202	发热经提纯的	75.3	11.0	—	13.0	0.5	-40	-40	渗碳气氛								
301	吸热的	45.1	19.6	0.4	34.6	0.3	10	50	307	吸热+碳化氢	无标准成分					—	—
502	活性炭	64.1	34.7	—	1.2	—	-29	-20	309	吸热+碳化氢	无标准成分					—	—

注：在这些气氛中的加热元件的相对寿命见表3.14-12。
①这种经冷冻获得4℃(40℉)的气氛，应用广泛。

除了钼、钽、钨和石墨以外，一般使用的电阻器材料在空气和大多数其他氧化性气氛里都有令人满意的使用寿命。

气氛的污染。如果有硫存在它将以硫化氢出现在还原性气氛中，以二氧化硫出现在氧化性气氛中。硫污染通常出自以下一种或多种的来源：用于产生保护性气氛的高硫燃料气体、用于金属加工的硫基切削油残留物，用于密封渗碳箱的高硫耐火砖、粘土或粘合剂，以及在炉里进行处理的金属。硫对于镍-铬和镍-铬-铁的加热元件都是有破坏性的。合金会在氧化性气氛中发生点蚀和气孔砂眼，并且在645℃(1190℉)中熔化的镍-硫共晶混合物，可以在任何一种类型的气氛中形成。含镍量越高，其侵蚀性也越大。因此，如果有硫存在并无法去除，Fe-Cr-Al元件的选用将优先于采用镍基合金制成的元件。

炉内气氛中的铅和锌的污染会是来自于工件的加工过程。这是在粉末冶金零件的烧结过程中常会发生的。在有还原性气氛存在的情况下，铅将从含铅的青铜粉末中挥发出来(例如用于制造烧结青铜衬套的粉末)，并对加热元件产生侵蚀且生成铬酸铅。金属铅的蒸汽对于镍-铬合金的危害远远大于硫，倘若是在不合适的浓度和温度的工况里，则造成加热元件的各种损坏也不过是数小时内的事情。较高镍基合金受到的影响也甚于较低含镍合金。含铅青铜粉末在845℃(1550℉)的还原气氛中的烧结过程中使用35Ni-20Cr-43.5Fe-1.5Si制造的加热元件，能得到令人满意的使用寿命。而在同样的用途中使用80Ni-20Cr，其寿命则很短。

在压制P/M的坯块时，作为润滑剂和粘合剂使用的硬脂酸锌会造成锌污染。当坯块加热时，硬脂酸锌会挥发出来，还会使加热元件渗碳(含有至少18%Zn的镍银的硬钎焊，也会造成炉子气氛里的高浓度锌蒸汽)。锌蒸汽与镍铬加热元件构成合金而使其寿命缩短，但是可以在较高烧结温度里通过用分离式烧化炉650℃(1200℉)，使用全马弗、加装护套、或高温陶瓷保护涂层的加热元件等保护方去除这种锌蒸汽。如果这些预防的方法都不能奏效，则无论高温还是低温，若预计有污染的话，都应当使用碳化硅的加热元件(它不受硫、铅或锌的污染影响)。

精选参考文献

- R.A. Watson et al., Electrical Resistance Alloys, *Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* Vol 2, *ASM Handbook,* ASM International, 1990, p 822–839.

第5节　电接触材料

电接触件就是接通和断开电路的金属器件。作为一种理想的电接触材料它应当具有：高电导率以使电流通过期间所产生的热量降到最低限度，高热导率可以使产生的电阻和电弧的两种热量得以散发，在所有各种环境中的高抗反应性可以防止绝缘的氧化物、硫化物和其他化合物的形成，以及能免除因电接触的接通和断开而造成燃弧。由这种材料形成接触闭合所要求的力如同相匹配的元件之间的电阻一样应当很低。应当有足够高的材料熔点，以此限制弧蚀、金属转移以及焊接或粘连的发生，但是还要足够的低以提高开关时的逆弧电阻(当熔点高,在电流突然降为0后,其触头还会继续加热接触气隙处的气体,使容易发生逆弧)。低蒸汽压可以将弧蚀和金属转移降低到最低限度。高硬度可以提供良好的耐磨性，还应有一定的塑性来保证容易加工。材料还需保持一定的纯度以确保其性能的一致性。无论材料还是任何制造所必要的工艺步骤，都不能给环境造成危害。最后，材料还要能以低成本获得其要求的产品形式。

因为尚没有一种材料能满足所有上述要求的性质，所以需要有一大批不同的接触材料以达到不同的应用目的。材料在经济上的选择则是在不同的工艺变量与使用要求之间进行平衡。当选择触头材料时，载荷条件、使用要求和在其单元寿命期间的周围条件都必须一一考虑到。

接通-断开接触的失效模式

在一种电接通-断开的开关装置里，存在两种不同类型的接触形式：燃弧接触和滑移接触。燃弧触头通常由一对薄的成形极板所构成，具有接通、保持和断开电路的实际功能。燃弧接触跟滑移接触的不同之处在于其开关装置的移动元件是沿着与接触表面相垂直的方向运动。于是会在开和关的动作过程中产生的电弧总是触撞和损坏导通电的表面。

燃弧。除非电路的电压或电流极低，燃弧是造成接触表面损坏的较重要因素，虽然不是主要因素。

当处于某一工作电路里的一对接触断开时，常会在接触副之间形成电弧，而且保持到它们的分离达到某一定的间距时电弧才会熄灭。当接触闭合时，出现燃弧相对不太严重。在闭合过程中，当移动的触头从静态压紧到弹起时也会发生燃弧。电弧通过喷洒出金属的熔滴、蒸发材料以及将金属转变为离子喷射而造成接触腐蚀。有时材料也会从一个触头上蒸发，然后凝固在另一个触头上，于是两个触头的表面形态都发生改变。这就是所谓的材料转移。

焊接。当一对触头在闭合时，一个移动触头在闭合和弹开的过程中所产生的电弧会熔化两个触头的一个小区域。当再次闭合时，熔化材料的固化就会以与熔焊相同的方式将接触副焊合。

在接触接通之后会发生另一种类型的焊接。为了使接触副有较好的电导性总要给接触副施加一机械载荷。从理论上说，载荷不可能使两个刚性接触表面的接触超过三个点。然而，两个表面的接触点发生弹性屈服或塑性屈服，则形成较大面积的接触。这些狭窄的区域承受通过接触触头的电流并形成高电流密度区。在这些区域产生热量，并且如果温度足够高，则两个接触头最终会焊在一起。偶尔，焊接处的强度超过开关装置将接触头开启的力，就会因为接触无法按照指令及时打开而导致整个电器系统的突发性失效。

桥路形成。当一个接触副被断开时，由于接触压力的逐渐变小而使其接触面积也逐渐减少。当连续开启动作造成接触面积的缩小时达到这样的一个程度，即其面积上的电流密度增大到足以熔化该区域上的材料。而这些接触头的持续分离会拉开熔化金属，形成一种电流的承载桥路。随着接触头被拉开，熔化桥路的温度不断升高。它可以变得足够高而使材料蒸发而最终使电路断开。这种开启接触副的“桥路”现象，会轻度损坏触头的表面并蒸发掉一些桥路上的材料。这一般会造成一个接触表面的点蚀和材料粘附到另一接触表面，这种不均匀的连续转移最终将侵蚀其中一个接触面。进而，由连续地形成桥路而生成的表面微凸体，将会使接触副咬合在一起并妨碍其机械脱开。

氧化。由于燃弧而产生的热量会使接触表面的氧化作用加剧，从而成为一个严重的问题，因为大多数的金属氧化膜都是不导电的或半导电的。氧化膜能轻易地增加接触电阻。在强电流的电路里，这将造成过量的接触热。在低电压和低电流的电路里由于氧化膜的增厚而在接触体侵蚀之前就使接触表面被完全绝缘。当一对接触副在不利的环境如带有污染的工业环境里时，这种现象发生得更为频繁。凝聚的有机聚合材料也会在轻载的贵重金属接触中产生作用。这种聚合材料来源于单聚体，它们从树脂中蒸发，并且在接触件活性催化金属表面发生聚合作用。

接通-断开燃弧接触的性能要求

在“接通-断开接触的四种失效模式”一章中讨论的四种失效模式确定了对燃弧接触材料的要求。在选择材料时，常有必要达到一种权衡使之得到合适的性能又不至于从整体上危及元件的一些带有根本性的特性，如可靠性、寿命和成本。最为重要的要求如下所列。

电导率。由于在接触副之间的电导性是仅取决于一些紧缩狭窄区，电导率越高，在这些部位上产生的热量就越少。

热学性能。高熔点和高沸点能减少因高燃弧热所造成的蒸发损失。高热导率能迅速散发热量和熄灭电弧。

化学性能。接触材料应当是耐腐蚀的，因而当接触在不利的环境中动作时，就难以形成绝缘膜(氧化物或其他化合物)。

力学性能。作用于接触副的主载荷就是在闭合过程中移动和静止接触头之间的闭合力和冲击。在接触副闭合时，两个接触表面之间总是存在一种相对运动。在一些装置如某些类型的继电器里，为其设计的一种摩擦闭合运动的目的就是为了去除所形成的任何氧化膜。然而，在重复的开和关过程中，摩擦表面之间的摩擦力会产生触头的磨损。一般来说，硬材料较为耐磨。可是硬材料往往有较高的接触电阻和较低的

热导率，两者都会有倾向促使较大的接触焊接。硬材料还有高的抗拉强度，这在电接触的应用中可以是也可以不是其优势。

制造性能。接触材料应当具有通过焊接、硬钎焊或其他连接方法连接到支承材料上的能力。此外，它们还应该足够的可塑性使其能成形，或能用粉末冶金(P/M)技术进行成形。

滑移触头

滑移接触的应用通常十分不同于燃弧接触。其摩擦、接触温度、力学依据和磨损也都不相同。

燃弧接触与滑移接触之间的根本不同是滑移接触要求其接触面上有膜，以利于在滑移时不会发生咬死或拉伤，剪切必须发生在这层膜内，而对两边材料只产生微小的损伤。往往有必要使用某种润滑剂。如果存在着潮湿，例如处于具有 -20℃(-4℉)或更高露点的环境中，就可以使用石墨。另外也可以利用非常薄的油膜，虽然过分的油蒸汽会导致成膜过度。也可以采用二硫化钼以及其他钼、钨和铌的硫属化物。氧、硫和其他的污染物会引起成膜的增加。

在空气中应用时，在氧化与成膜(促使电压降的增加)和在微动磨损或油膜破裂与表面清除作用(促使电压降的减小)之间所保持的一种平衡会形成一个电压降。在缺少润滑剂的情况下，微动磨损和氧化是最重要的问题。在惰性或还原气体中，氧化反应大大削弱，同时电压降的减小一直到由于机械方面因素的阻碍才停止。有适当润滑的惰性金属也能将空气中的电压降减小到最低限度。

电刷触头。如果要将其应用于低电压(<24V)的用途里，它们一般需有相当含量的金属。在汽车和与之相关工业，如启动马达电刷和辅助马达电刷都要大量使用电刷触头，铜石墨是其使用的主要材料。银石墨电刷则主要用于仪器和外层空间的用途。某些银石墨电刷应用于线焊机及类似的设备上。

滑移触头的氧化作用除表面因摩擦损伤而氧化得更快速外，都与燃弧触头的相似。在空气中的大多数用途里，金属表面会生成一层膜，它是一种石墨、氧化物、硫化物和水的复合混合物，它具有减小导电面积的倾向。

金属石墨电刷经过磨损而形成的表面是一种有效的清洁剂，它们会将膜磨去并能为导电保持较大的面积。有时甚至还可以在电刷上添加磨料材料，以此在有危害的气氛里防止过度成膜。

由于摩擦中的主要因素是所存在任何膜的抗剪强度，故这种受气氛污染影响的膜的成分是重要的。

电刷材料。考虑到工业上可供使用的材料范围包括金属粉末、石墨、其他润滑剂以及工艺变量，可能开发的适用于电刷的材料可谓不计其数。然而，开发成功的商用牌号还是有限的，而且它们大部分都是铜石墨(4%~70%石墨)和银石墨(3%~50%石墨)合金(后者合金还可含有二硫化钼)。

用铜及其合金制造的电刷触头要多于其他种类的材料。在一些会使铜金属引起氧化的用途里可以采用银。钨或使用更为稀少的钼，则应用于要求高熔点的地方。铂和钯和金可以用于要求接通可靠且接触力小的用途上。用贵重金属包覆或电镀的以及用烧结合金制成的电刷，在动力开关继电器的一般用途里都是重要的。

相互依存的因素。当将触头固定一个通常用铜合金制成的支架上时，支架材料的性能以及触头与支架间的界面性能(也即粘结的面积和越过其界面的电导率)对于其最终性能是至关重要的。触头支架起到散热器以及结构部件和导电体的作用。其系统的整体效率取决于触头、触头支架及它们间的连接方法，所有这些都会影响特定用途所要求的触头尺寸。为了节省贵重金属，触头材料、支架材料和连接方法都必须进行优化。支架采用一些高强度、高电导率的铜合金制造是由于其具有结构性能和在硬钎焊温度下的抗软化性。

能够使界面合金化最小、支架软化最小而粘结面积最大的连接方法，一般能促使接触体系在整体上形成最佳的性能组合。普通的连接方法包括硬钎焊、电阻焊、冲击焊和电阻感应火焰焊。采用能提供最局部化热量输入的焊接方法，就能将支架在硬钎焊的过程中会发生的软化降到最小程度。利用如钢、镍或蒙乃尔高强度耐腐蚀镍钢等焊接性较好的材料作为背衬，再常用贵重金属进行涂覆，以此提供与支架的最佳焊接相容性。还可以将接触背衬压制或轧制成凸台以有利于焊接。

冲击焊不需为其连接提供专门背衬。然而，与硬钎焊、弧焊和机械连接(铆接)比较，冲击焊由于相对较高的成本已不再受欢迎。

工业用触头材料

电触头的工业用材料按其制造方法可分为两大类：①锻压材料，包括纯金属和合金；②复合材料，包括粉末冶金产品和内氧化的银合金。

铜金属

由于铜的高电导率和高热导率、低成本以及易于

制造促成其在电触头上的广泛应用。铜触头的主要缺点就是其耐氧化和耐腐蚀性很差。在许多用途里，因一般的氧化和腐蚀形成的膜所造成的电压降还是可以接受的。在一些电路断路器的应用里，触头浸在油中，以防氧化的发生。在另外的一些用途如鼓形控制器里，通过充分的滑触能使触头保持较为清洁的表面，从而使电路有较低的电阻。在某些用途如闸刀开关、插头和螺栓接插件里，接触表面用润滑脂、或银、镍或锡的涂层进行保护。在动力电路里铜的氧化会引起麻烦，故触头常得镀银。真空密封电路断路器使用无氧的铜触头（锻压或粉末金属），以获得最佳电学性能。

在空气中铜无法为燃弧、焊合和粘结提供高电阻。在这些性能很重要的用途中，可以使用铜-钨或铜-石墨的混合物。然而，当在氮气中使用时，Cu-CdO 触头具有与 Ag-CdO 相似的功能。铜还适用于在真空断路器的强电流场合。

纯铜相对较软，在低温下退火，缺乏有时还需要的弹性。一些铜合金比纯铜硬，并具有好得多的弹性，如表 3.14-14 所示。可以通过添加 0.25% Zn、0.5% Cr、0.03%~0.06% Ag(10 ~ 20oz/t)，或少量的细化弥散的金属氧化物如 Al_2O_3 来提高铜的退火温度，而其电导率几乎不受损失。相反，只有牺牲电导率才能实现弹性的改善。析出硬化合金、弥散硬化合金和粉末金属混合料可以提供范围很广的电学和力学性能。

表 3.14-14　用于电接触的铜金属的性能

UNS 编号	固相线温度		电导率，%IACS	硬　度		抗拉强度			
				OS035 回火	H02 回火	OS035 回火		H02 回火	
	℃	℉				MPa	ksi	MPa	ksi
C11000	1065	1950	100	40HRF	40HRB	220	32	290	42
C16200	1030	1886	90	54HRF	64HRB①	240	35	415①	60①
C17200	865	1590	15 ~ 33②	60HRB③	93HRB④	495③	72③	655④	95④
C23000	990	1810	37	63HRF	65HRB	285	41	395	57
C24000	965	1770	32	66HRB	70HRB	315	46	420	61
C17000	905	1660	27	68HRF	70HRB	340	49	420	61
C50500	1035	1900	48	60HRF	59HRB	276	40	365	53
C51000	975	1785	20	28HRB	78HRB	340	49	470	68
C52100	880	1620	13	80HRF	84HRB	400	58	525	76

①H04 回火。　②取决于热处理。　③TB00 回火。　④TD02 回火。

应用。铜基金属常用于插头、插口、插座、接头和滑移触头。由于锈膜的生成，必须保持很高的接触力和滑移量，以防止形成过度的接触电阻和高度的电噪声。黄铜（C27000）因为其易加工性而适合于做成插头和端子接头。磷青铜（C50500 或 C51000）由于其强度和耐磨性而适用于细小的插座和接头里的簧片、滑移开关铜片。锌白铜有时比黄铜更适合用于继电器和插口簧片，因为它具有高弹性模量和强度，并能耐锈蚀和有较好的外观。有时铜合金经过镀镍来提高其表面硬度、减少腐蚀和改善外观。然而，镍会有薄而硬的氧化膜并造成高接触电阻，故需要很大的接触力和很长的滑移才能将其破坏。为了保持低水平的接触电阻和电噪声，铜金属应当镀以或覆镀贵重金属。

银金属

无论是纯银的还是合金银都是接通-断开次数范围可观（1 ~ 600A）的触头应用最广的材料。纯银的力学性能和硬度可通过合金化而得以改善，却因此会对它的电导率和热导率造成负面影响。图 3.14-23 所示是不同的合金元素对银的硬度和电阻率的影响。一些应用于电触头的主要银金属的性能如表 3.14-15 所示。银广泛应用于一些需要长期保持闭合的触头上，并以电极的形式广泛用作连接插头和插座的镀层。它还用于受到偶尔滑移的触头如旋转开关上，和程度有限地用于低电阻的滑移触头如滑环上。

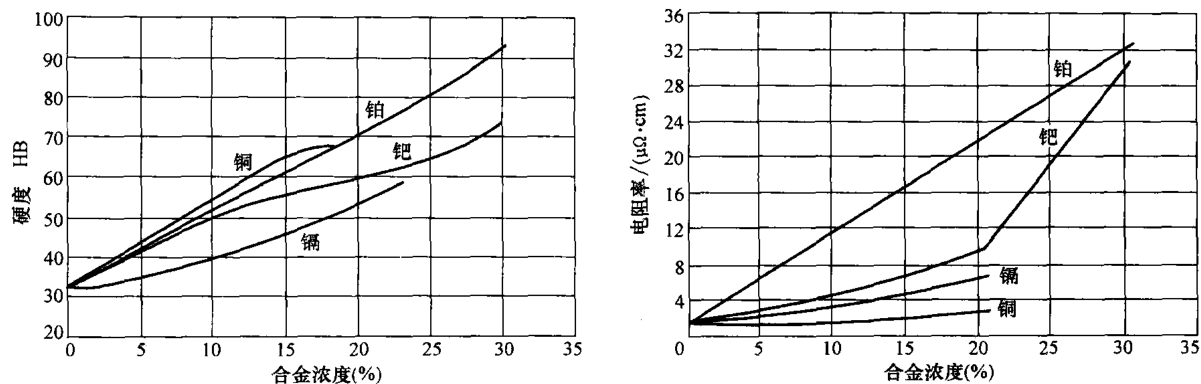


图3.14-23 银合金触头的硬度、电阻率与合金含量的关系

表3.14-15 用于电触头的银金属性能

合金	固相线温度		电导率，% IACS	硬度 HR15T		抗拉强度				密度/(g/cm³)	50mm(2in)长的伸长率，(%)	
	℃	℉		退火	冷变形加工	退火 MPa	退火 ksi	冷变形加工 MPa	冷变形加工 ksi		退火	冷变形加工
99.9Ag	960	1760	104	30	75	170	25	310	45	10.51	55	5
99.55Ag-0.25Mg-0.2Ni	—	—	70	61	77	207	30	345	50	10.34	35	6
99.47Ag-0.18Mg-0.2Ni-0.15Cu	—	—	75	64	84	—	—	—	—	10.38	—	—
99Ag-1Pd	—	—	79	44	76	180	26	324	47	10.14	42	3
97Ag-3Pd	977	1790	58	45	77	186	27	331	48	10.53	37	3
97Ag-3Pt	982	1800	45	45	77	172	25	324	47	10.17	37	3
92.5Ag-7.5Cu	821	1510	88	65	81	269	39	455	66	10.34	35	5
90Ag-10Au	971	1780	40	57	76	200	29	317	46	11.03	28	3
90Ag-10Cu	775	1430	85	70	83	276	40	517	75	10.31	32	4
90Ag-10Pd	1000	1830	27	63	80	234	34	365	53	10.57	31	3
86.8Ag-5.5Cd-0.2Ni-7.5Cu	—	—	43	72	85	276	40	517	75	10.10	43	3
85Ag-15Cd	877	1610	35	51	83	193	28	400	58	10.17	55	5
77Ag-22.6Cd-0.4Ni	—	—	31	50	85	241	35	469	68	10.31	55	4
75Ag-24.5Cu-0.5Ni	—	—	75	78	85	310	45	552	80	10.00	32	4
72Ag-28Cu	775	1430	84	79	85	365	53	552	80	9.95	20	5
60Ag-23Pd-12Cu-5Ni	—	—	11	86	93	517	78	758	110	10.51	22	3

电导率和热导率。由于银在所有金属中具有在室温下最高的电导率和热导率，它能传导强电流又不会产生过热，即使当触头的尺寸有一定的限制时。触头一旦进入使用，虽然需要有良好的热导率，但是这种热导率仍会增加装配焊接的困难，除非通过熔覆加上一层较高的电阻层。

在元件的组装件中，银穿过和围绕绝缘层的迁移会造成绝缘的破坏。当含有某些材料如酚纤维的触头进入接触并在一定电压之下时，银以离子方式迁移穿过或越过绝缘材料，形成一种会降低穿越绝缘层的电阻的螺旋状连接。这就降低了绝缘质量，而且如果空气潮湿时，这种降低更大。必须审慎设计绝缘体来防

止这种损害的发生。

耐氧化性。银代替铜的应用主要是因为它在空气中的耐氧化性。一般来说，氧化银对于银触头无论其触头是接通还是断开线路，都不会成为问题。然而，氧化银是由于暴露在臭氧中或其他方法而产生的。这种氧化物的电阻率高，当加热到约175℃(350℉)它被缓慢分解，达到约350℃(650℉)被迅速分解并通过燃弧予以除去。这种“自清除”特性在金属当中是很不寻常的，并且是银能作为接触材料的一个诱人的主要理由。

在潮湿条件下，银遭受硫或硫化物气体的侵蚀而易于损坏。造成的硫化物膜会形成明显的接触电阻，尤其当接触力、电压或电流低时。直流电流会将基体中的银离子带入硫化物中去，并在那里形成连接电桥。所以，尤其在高直流电流场合下，其形成的膜会具有一些导电能力。硫化银膜的电阻随温度的升高而减小——在360℃(680℉)里Ag_2S会缓慢分解，并在更高的温度下加速分解。此外，这种膜还会加剧腐蚀和沾染灰尘。

银触头的局限性。用于接通-断开的银触头有相当长的接触寿命，可使用的电流高达600A。在纯银触头中，有时产生的困难在于金属从一个电极转移到另一个极上，从而导致在一个触头表面上形成凸起而在另一个上形成凹坑。当银触头应用于直流电路上时，由于金属转移的直接结果，银触头由于机械粘附而最终遭受损伤。转移的方向是从正触头到负触头，但是在燃弧的影响下其方向会反向。对于强电流或感应负载，采用电阻-电容保护电路对负载进行分流来减少侵蚀的发生是合乎要求的。

当燃弧在空气中产生辉光放电时，由于与空气发生化学的相互作用形成$AgNO_2$，以致对银的侵蚀速度异常高。

为达到低电阻和低水平的噪声，作为接触装置的设计必须有足够的力和滑移，用以穿破任何硫化银的膜，并在界面上保持无膜和金属对金属的接触的状态。接插件应该有很大的滑移力和若干牛顿的法向力。具有高达490mN(0.11lbf)的法向力和相当的滑移量的旋转开关应该有润滑脂的保护层，以减少硫化作用并清除磨料颗粒。在低噪声的传输电路里，银不应当用于继电器和其他的对接触头上，它们的接触力小于195mN(0.044lbf)时，则可以用其他贵重金属如金或铂代替银。

硫化银的膜上会有十分之几伏的特征性电压降。只要这个电压降是允许的，银触头将能实现可靠的接触闭合。然而由于外面撞入的灰尘，使硫化膜起着一种灰尘俘获器的作用，由此造成的闭合失效将大于用其他贵重金属触头。

对于许多用途，银因太软而超过其允许的机械磨损。将铜、镉、铂、钯、金和其他元素作为合金加入，都能有效地提高其硬度并改善银的接触性能。然而这样加入后，与纯银相比会降低其导电性和耐腐蚀性。

金金属

纯金具有无以比拟的耐氧化和耐硫化性，但是低熔点及其对侵蚀的敏感度限制了它在电流低于0.5A的情况下作为电接触的使用。尽管在金的表面并不会形成氧化物和硫化物膜，但是当金触头在存在有机物蒸气的条件下工作时有时候会形成碳质沉积物。这种膜的电阻为几欧姆。

当金用于含钯或铑的接触件时，据称有非常低的接触电阻。

金的低硬度可以通过与铜、银、钯和铂的合金得以提高，但是其应用因其低熔点而必须严格限于低电流的用途里。

金及其合金的性质如表3.14-16所示，如果需维持低锈蚀率和低接触电阻，则金的含量应当约不低于70%。

表3.14-16　用于电触头的金金属性能

合金	固相线温度		电导率,% IACS	硬度 HR15T		抗拉强度				密度/(g/cm^3)
						退火		冷变形加工		
	℃	℉		退火	冷加工	MPa	ksi	MPa	ksi	
99Au	1085	1985	74	40	65	—	—	—	—	19.36
90Au-10Cu	932	1710	16	76	91	400	58	705	102	17.18
75Au-25Ag	1029	1885	17	50	77	—	—	—	—	15.96
71.5Au-14.5Cu-8.5Pt-4Ag-1Zn	925	1700	11	88	96	—	—	—	—	15.9
72.5Au-14Cu-8.5Pt-4Ag-1Zn	954	1750	10	88	96	—	—	—	—	16.11

（续）

合　金	固相线温度		电导率，% IACS	硬度 HR15T		抗拉强度				密度/(g/cm³)
						退　火		冷变形加工		
	℃	℉		退火	冷加工	MPa	ksi	MPa	ksi	
72Au-26.2Ag-1.8Ni	—	—	14	61	81	230	33	345	50	15.56
71Au-5Ag-9Pt-15Cu	—	—	8	88.5	75①	700	101	1170	170	16.02
69Au-25Ag-6Pt	1029	1885	10	70	84	275	40	415	60	15.92
50Au-50Ag	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.59

①洛氏硬度15N。

铂族贵重金属

铂和钯是铂族中两种最重要的金属。这些金属具有高耐锈蚀性，因此能为继电器和其他接触力小于490mN(0.110lbf)的装置提供可靠的接触闭合。它们的高熔点、低蒸汽压和耐燃弧性使之适用于闭合和开启的负荷范围尤其高至1A的一些触头上。这些金属的低电导率和热导率及其成本一般都排除它们在电流约大于5A上的应用。

钯具有仅略小于铂的燃弧极限，在用于电话和类似用途中，处置电流为1A的较小继电器上具有相类似的性能。在这些用途里，钯能满意地替代铂。表3.14-17列出了铂、钯以及它们合金的性能。

表3.14-17　用于电触头的铂和钯金属的性能

合　金	固相线温度		电导率①，% IACS	硬度 HR15T		抗拉强度				密度/(g/cm³)	50mm(2in)长的伸长率(%)
						退火		冷变形加工			
	℃	℉		退火	冷变形加工	MPa	ksi	MPa	ksi		
99.9Pt	1770	3220	15	60	73	138	20	241	35	21.45	35
95Pt-5Ru	1775	3230	5	84	89	414	60	793	115	20.57	18
92Pt-8Ru	—	—	4	86	91	483	70	896	130	20.27	15
90Pt-10Ir	1780	3240	7	87	92	379	55	620	90	21.52	12
89Pt-11Ru	1815	3300	4	91	96	586	85	1034	150	19.96	12
86Pt-14Ru	1843	3350	3	93	99	655	95	1172	170	19.06	10
85Pt-15Ir	1787	3250	6	90	95	517	75	827	120	21.52	12
80Pt-20Ir	1810	3290	5	93	97	689	100	1000	145	21.63	12
75Pt-25Ir	1819	3310	5	95	98	862	125	1172	170	21.68	10
73.4Pt-18.4Pd-8.2Ru	—	—	4	90	92	517	75	862	125	17.77	12
65Pt-35Ir	1899	3450	4	97	99	965	140	1344	195	21.80	8
99.9Pd	1554	2830	16	62	78	193	28	324	47	12.17	28
95Pd-5Ru	1593	2900	8	79	89	372	54	517	75	12.00	15
89Pd-11Ru	1650	3000	6	85	92	483	70	689	100	12.03	13
72Pd-26Ag-2Ni	1382	2520	4	82	90	469	68	689	100	11.52	13
60Pd-40Ag	1338	2440	4	65	91	372	54	689	100	11.30	28
60Pd-40Cu	1200	2190	8	82	92	565	82	1331	193	10.67	20
35Pd-9.5Pt-9Au-14Cu-32.5Ag	1085	1985	5	90	94	689	100	1034	150	11.63	18
35Pd-10Pt-10Au-14Cu-30Ag	1015	1860	5	90	98	827	120	1240	180	11.8	20
44Pd-38Ag-16Cu-1Pt-1Zn	1032	1890	7	91	96	758	110	1205	175	10.8	15

①退火状态的材料。

耐腐蚀性。铂具有很强的耐腐蚀性，包括耐氧化、硫化和盐水的腐蚀。在任何温度下，它都不会生成稳定的氧化物。

钯能在常温下耐氧化。如果加热到350℃(660℉)以上，它将会缓慢氧化生成在室温下稳定的氧化物。然而当加热到800℃(1470℉)或发生燃弧时，其氧化物就会迅速分解。不能认为氧化物是电话型继电器闭合可靠性的重要因素。

有机物气体在接触区的存在会严重影响电接触头的寿命和可靠性，尤其是一些以低接触力为特点的贵重金属普遍应用于高可靠性、低噪声的电路里。一些具有破坏性的有机蒸汽都能因为线圈型式、线涂层、绝缘、软钎焊剂、封装和密封化合物以及其他一些与电子设备有关的有机物而产生，还为由于一些外部的因素而产生。

贵重金属涂覆层

银、金、铑以及应用程度较小的铂、钯都可应用于包覆和电镀的触头上。电沉积和包覆竞相应用于许多相同的用途。包覆层的优势在于其较低的疏松度，而电沉积物对于只需薄薄一层的贵重金属来说稍微便宜一些。电沉积物往往比退火的锻压材料有更高的硬度，作为一个极好的例子是铑具有的沉积硬度超过其在退火状态下的600HV。电镀铑在研磨或擦拭情形里所表现的超耐磨性，就是因为其高硬度所致。铑在银或基体金属的触头上甚至只有0.13～0.5μm(5～20μin)的厚度都能改善其耐磨性和将锈蚀降到最低限度。

在银触头上电镀金可用于将锈蚀降到最低限度。镍的打底涂层(隔层)用于防止银迁移穿过金的镀层。最近的研究表明在高温中银沿镍晶界的迁移将加速进行。因此，镍隔层在高温应用中还是有疑问的。这方面的其他研究已经揭示钯能代替金用于保护涂层以延长其适用期。电镀金也能应用于钯触头上，以便在小功率电路里将聚合材料的形成降到最低限度。然而如果触头发生摩擦或电弧时，在银和钯触头上的金电沉积物将很快被磨损掉。

有时将电镀银用于铜基材料上以获得较为便宜的元件。电镀银稍硬于经退火的锻压银。在银上，电镀钯和铂能改善其耐锈蚀性。电镀于银的钯、铂和金可防止在绝缘支架上形成导电纤丝。

包覆层广泛应用于要求贵重金属厚度为0.025～1.3mm(0.001～0.050in)的用途上。这样的厚度用电镀是无法得到的。这些用途包括用于其电流范围很可能会发生燃弧，并由此引起侵蚀的一些机电装置里。这些装置必须保留充分的贵重金属，用以经受在其所要求的寿命周期里会始终遭受的侵蚀。

钨和钼

作为又一种主要元件，大多数的钨和钼触头都制成与银或铜复合材料的形式(见“复合材料”一节)。其实，最早被作为电触头应用的是钨而不是铜和银，钨具有所有金属中最高的沸点(5930℃或10700℉)和熔点(3110℃或5625℉)，它还有室温和高温下非常高的硬度。因此，作为一种接触材料，它能提供极佳的耐机械磨损和电侵蚀的性能。其主要缺点是低耐腐蚀性和低电导率(31% IACS)。经过短时期的运行之后，在钨的触头上会形成一层氧化膜，造成非常高的接触电阻。需要相当大的力才能破碎并穿透这层膜，但是由于其高硬度，就是高压和相当大的冲击对其底下的金属也造成不了什么破坏。钨触头用于闭合力大于20N(4.5lbf)的一些开关装置上以及一些高电压且电流不超过5A的电路上，如汽车点火器、振动器、喇叭、电压调节器、永磁电动机和电动剃刀。在低压直流装置中，钨都是用于作为负触头，并且与用贵重金属制成的正触头相匹配。

用烧结过的粉末压坯再进行模压或轧制而成钨的圆棒或带材，其塑性非常低。它们无法像其他触头材料那样进行冷变形加工。钨圆片通常用圆棒切割或用带材冲制，然后直接硬钎焊成有功能的零件如断电臂、支架或簧片。

像晶粒大小、晶粒形态和纤维结构等级的一些影响接触功能的性能都是利用专用的型锻方法和退火流程进行控制的。钨圆片通常供应的都是经磨削精加工，但是也可以通过电化学抛光得到高度光亮的表面。

钼的高沸点和高熔点——分别为5560℃(10040℉)和2610℃(4730℉)——都是仅次于钨和铼。由于它在燃弧中比钨更容易被氧化和更快遭受侵蚀，所以其应用也不如钨那么广泛。尽管如此，由于钼的密度(10.2g/cm^{3}或0.369lb/in^3)只有钨的(19.3g/cm^{3}或0.697lb/in^3)一半左右，故钼在质量成为重要的用途方面具有优势。钼(体积分数)的成本也比较低。

除了用于闭合-断开的触头以外，钼还广泛应用于水银开关，因为它不受侵蚀，且仅有它能被汞润湿。

如同钨一样，钼带材和薄板可以利用经烧结粉末压坯的模压或轧制进行制造。用其圆棒或薄板制造得到的圆片再经过硬钎焊成为毛坯或其他结构元件。

铝

铝一般是较差的触头材料，因为它易于氧化，但

是由于其良好的电学和力学性能、容易得到和成本低廉，它还是能在一些接触用途中得到应用。铝 1350 就是可以用于这样的用途。

在那些将铝用于接触连接的用途里，它应该用铜、银或锡进行电镀或包覆。铝决不要在会引起燃弧的动力触头器件上使用。例如，如果将铝代替银用于马达起动器，当负荷中断时，由于马达起动器的去激励中的电流未及时断开而会发生爆炸。

复合材料

复合材料主要分为三类，即按照分别用 P/M、内氧化(IO)法或 P/M 和 IO 两者结合的方法制造的为：耐熔金属或碳化物基的、银基的和铜基的。表 3. 14-18 列出不同种类的触头材料及其各自的制造方法。耐熔金属或其碳化物基的触头材料包括 Mo-Ag、WC-Ag、W-Ag、WC-Cu 和 W-C-Ag 系统。银基复合材料又分为两类：第一类是用纯元素(镍、钨或钼)或石墨作为其弥散相，第二类复合材料用半耐熔氧化物(CdO、SnO_2 或 ZnO)作为其弥散相。在这两类复合材料中，硬度随弥散相体积所占比例的增加而增加，而电导率则随之降低。银-氧化镉类的电接触材料是所有银半耐熔触头材料中应用最为广泛的。铜基触头材料包括钨作为其弥散相的材料。

表 3. 14-18　所选的复合电触头材料的性质

名义成分(%)	制造方法①	密度/(g/cm^3)	电导率,%IACS	硬　度	抗拉强度	
					MPa	ksi
钼-银						
90Ag-10Mo	PSR	10. 38	65 ~ 68	35 ~ 40HRB	—	—
65Ag-35Mo	PSR	10. 30	55 ~ 64	49 ~ 55HRB	—	—
35Ag-65Mo	INF	10. 00 ~ 10. 08	40 ~ 45	82 ~ 92HRB	—	—
10Ag-90Mo	INF	10. 13	27 ~ 30	97 ~ 102HRB	—	—
银/氧化镉						
85Ag-15CdO	PSR	8. 60 ~ 9. 58	55 ~ 75	35HRF②	83②	12②
	PSE	9. 90 ~ 10. 06	55 ~ 75	57HRF②	193②	28②
				80HRF③	241②	35③
	IO	10. 06	65	50HRF②	207②	30②
				85HRF③	269③	39③
	PPSE	10. 06	72	70HRF②	276②	40②
				90HRF③	331③	48③
银-石墨						
99Ag-1C	PSR	9. 40 ~ 10. 12	87 ~ 99	24 ~ 36HRF②	162②	23. 5②
				68 ~ 69HRF③	241③	35③
95Ag-5C	PSR	8. 30 ~ 8. 68	55 ~ 62	25HRF	—	—
	PSE	8. 84	75	40HRF	—	—
90Ag-10C	PSR	6. 30 ~ 7. 20	43 ~ 53	13HRF②	—	—
				30HRF③	—	—
银-镍						
90Ag-10Ni	PSR	9. 70 ~ 10. 32	75 ~ 90	35HRF②	172③	25③
				89HRF③	—	—
60Ag-40Ni	PSR	8. 90 ~ 9. 60	44 ~ 47	40HR30T②	241②	35②
				92HR30T②	414③	60③
	PSE	9. 60	60	46HR30T②	—	—

（续）

名义成分(%)	制造方法①	密度/(g/cm^3)	电导率,%IACS	硬　度	抗拉强度	
					MPa	ksi
银-镍						
40Ag-60Ni	PSR	8.80	32	35HR30T②	—	—
				97HR③	—	—
	PSE	9.30	40	68HR30T②	—	—
20Ag-80Ni	PSR	8.00	21	35HR30T②	—	—
银/氧化锡						
92Ag-8SnO_2	PSE	10.00	88	58HV②	205～230	30～33.5
				92HV③	—	—
90Ag-10SnO_2	PSE	9.97	82	64HV②	215②	31②
				98HV③	—	—
88Ag-12SnO_2	PSE	9.68	72	72HV②	—	—
				105HV③	—	—
碳化钨-银						
65Ag-35WC	INF	11.53～11.85	55～60	50～65HRB	272	39.5
	PSR	11.10～11.80	50～60	50～62HRB	—	—
50Ag-50WC	INF	12.12～12.50	43～52	75～85HRB	276	40
35Ag-65WC	INF	12.90～13.18	30～37	95～105HRB	—	—
钨-银						
90Ag-10W	PSR	10.30～11.20	90～95	20～33HRB	—	—
65Ag-35W	PSR	12.1	68	80HV②	—	—
				90HV③	—	—
35Ag-65W	INF	14.20～14.77	45～53	80～93HRB	—	—
	PS	13.90～14.20	47～50	85～87HRB	—	—
	PSR	14.65～14.74	47～50	55～65HRB③	—	—
10Ag-90W	PSR	17.25	29～35	95～105HRB	379	55
碳化钨-铜						
50Cu	INF	11.00～11.27	42～47	90～100HRF	—	—
30Cu	INF	12.65	30	38HRC	—	—
钨-铜						
75Cu-25W	PSR	9.45～10.00	50～79	35～60HRB	—	—
50Cu-50W	INF	11.90～11.96	45～63	60～81HRB	—	—
35Cu-65W	INF	13.35	54	83～93HRB	—	—
20Cu-80W	INF	15.20	30～40	95～105HRB	758	110
钨-石墨-银						
46Ag-53W-1C	PSR	12.85	55	85HRB	—	—
45Ag-50W-5C	PSR	10.60	37～43	45～55HRB	—	—

①PSR，轧制-烧结-再压制；INF，压制-烧结-渗透；PS，压制-烧结；PSE，压制-烧结-挤压；IO，内氧化；PPSE，预氧化-压制-烧结-挤压。　②退火。　③冷变形加工。

复合材料的制造方法

渗透法。它专用于制造耐熔金属和含碳化物的触头材料。金属粉末或碳化物粉末首先按要求的成分进行混合；并加入少量的粘结剂以增加烧结前的强度，也可不加入；然后压制和烧结成具有所要求形状的含空隙骨架坯块。继而将银或铜渗透进入骨架坯块的孔隙中。这种方法生产的最为致密的复合材料一般达到理论密度的97%或更高。由于在经烧结的骨架坯块里存在有被闭合的孔隙，故完全致密化是不可能的。渗透之后，接触件有时要进行化学或电化学的腐蚀，使其表面出现纯银。经过如此处理的触头具有较好的耐腐蚀性，并且在应用的早期能很好地运行。

压制-烧结。对于小的耐熔金属触头(直径不超过约25mm或1in)，可以先将按精确的最终成分配比混合的粉末压制成形，再在低熔点成分的熔化温度(液相烧结)下进行烧结，以此获得高密度的材料。在某些情况里，加入一种激活剂如镍、钴或铁来改善对耐熔金属颗粒的烧结效果。在这种工艺里要求细得多的粉末颗粒，从而有较多的粘结表面存在。然而，这种工艺过程形成的骨架坯块比渗透法形成的要差。骨架坯块的形成通常会使复合组成中耐熔部分的表观体积发生收缩，促使熔化的组分渗出到达成品触头的表面。

压制-烧结-再压制工艺。这种可应用于所有种类的触头材料，特别是银基类的材料。将以正确配比混合的粉末按所要求的形状压实，再进行烧结。随后通过二次压制(再压制)使之进一步致密化。有时还可经二次烧结或退火，使其性能得以改善。这种工艺的普遍性使其适用于任何一种形状和任何一种材料的接触件。然而要让获得的材料密度如同采用其他工艺所获得的一样高还是有困难的。还有，照此生产的材料，其颗粒间的粘结也较弱。

压制-烧结-挤压工艺。将按最终配比混合的粉末压制成为锭块并进行烧结。然后将锭块挤压成为线材、扁坯或其他所要求的型材。经挤压的材料接着进行轧制、模压和拉制的加工。用这种方法制造的材料通常是完全致密的。

压制-烧结-挤压工艺大都用于银基复合材料。用于制造银基复合触头的其他工艺都是用疏松的粉末直接进行挤压或直接轧制。虽然它们看似不太寻常，但是只要设备的设计和制造合适，这种工艺还是经济实用的。

内部氧化。含有弥散金属氧化物的银基复合材料可以用内部氧化的方法生产。在这种工艺中，首先将一种银合金(如银-镉合金)铸造成锭块，它们再经过轧制成为带材或进一步加工成为产品的成品形式。然后将银合金材料在空气或氧气中进行加热；于是，氧气扩散进入合金并形成在银基体中弥散的金属氧化物颗粒(如在银-镉合金中的CdO)。

在相当部分的Ag-CdO复合材料生产中使用内部氧化法。无论是带材还是成品形式的原始银-镉合金，都可以进行内部的氧化。银-镉合金在空气、富氧空气或加压氧气的炉子里加热到800～900℃(1470～1650℉)。在此条件下，氧物质扩散进入银-镉合金内部将镉物质氧化。待氧化完成，材料的横截面将能显示出氧化镉颗粒镶嵌在银基体上的显微组织。接触件都是用带材冲制而成，并压制成所要求的形状。

预氧化-压制-烧结-挤压工艺。这种工艺专用于制造银-氧化镉(Ag-CdO)的材料。合金被压制成为片状、条形或碎箔状的小颗粒。这些颗粒经过氧化，然后用压制-烧结-挤压工艺进行固结。以这种方法制造的材料比用同样的材料以传统的内部氧化法所制造的更为均匀一致。其力学性能也优于用同样的材料以压制-烧结-再压制的方法所制造的。

同时析出。银和氧化镉粉末以传统方法的混合或机械混合是通过将适量的银和镉金属溶解于硝酸里而开始的。银和镉的化合物从溶液中同时析出，这时溶液的pH值是通过加入氢氧化物或碳酸盐溶液而改变。在此后约500℃(930℉)的煅烧过程中，复合混合物分解形成银和氧化镉的混合物。通过充分的清洗，碱金属的含量能以ppm的范围加以控制。钠、钾和锂的控制量可以增强其电学寿命。过量的这些元素会导致快速腐蚀、再触发和一般性差的电学寿命。根据装置的设计，其范围可以从10～300ppm。借助传统的P/M方法将这种混合物固化成为接触件。用这种方法制造的接触件，显示出一种比用传统混合方法所制造的材料颗粒更细、弥散CdO相更均匀的显微组织。

精选参考文献

- Y-S. Shen et al., Electrical Contact Materials, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 840–868.

第6节　热电偶材料

热电偶温度计是迄今为止金属工业应用最广的温度测量装置。应用于金属工业上的温度传感装置中估计热电偶温度计要占到90%以上。这种装置的突出有益的特性就是包括精度高、使用的温度范围大、热

响应快速、坚固耐用、可靠性高、成本低和应用范围广。

热电偶温度计基本上都是由一种称为热电偶的、能产生一个随温度变化而变的电动势力(emf)的温度传感元件和一个用于测量emf的装置所构成的系统。后者包括一个将emf转变为一个与温度单位相当的印刷刻度盘以及一根用以将热电偶连接到emf测量装置的导体(延伸补偿电线)。有关热电偶所依据的原理及其设计依据的详细论述可参阅《ASM手册》第2卷中的：热电偶材料一章。

热电偶原理

热电偶是一种从测量得到的单由(两根)导线产生的热电位差，推算出一对不同金属导线的两个端点间温度差的装置。一种金属或合金上存在的温度梯度的会导致沿该温度梯度而建立的电位势梯度。这个热电位势梯度与温度梯度成正比，并因金属不同而异。事实上，对同样温度梯度在不同的金属或合金上产生的热电势emf是不一样的，利用这种效应可以进行温度的测量。

基本电路。热电偶的基本电路如图3.14-24a所示。热电偶由一端连接(硬钎焊或焊接)在一起的两根不同金属线所构成，以此形成一个测量点或热结点。其另外一端连接于测量电路的铜线上的称为参照或冷结点。输出以微伏为单位的电信号与测量(热)结点与参照(冷)结点之间的温度差成正比。按照不同冶金组分分类的不同类型的热电偶具有不同的输出信号标定值。

热电偶线的组合称之为热电偶元件。一个完整的热电偶总成包括其元件以及对金属线进行电绝缘并为形成工作环境免遭损坏而实施保护的一个系统(见小节“绝缘与保护”)。此外，作为组装还要在其头部装有安装接头和连接端子。与热电偶元件的热电特性相匹配的延伸补偿导线用于将连接端子连接到测量仪上。图3.14-24b表示在保护管中完整的热电偶总成。热电偶的工作寿命和精度取决于工作温度、在工作温度中的时间和从高温到低温工作循环周。

热电偶的种类

工业上使用的热电偶是按照材料特征(活性金属或惰性金属)和标准化进行分类的。目前，已经有五种活性金属和三种惰性金属热电偶类型，并且由ANSI(美国国家标准协会)、ASTM(美国试验和材料学会)和ISA(美国仪器学会)规定字母代号。其余在用的热电偶中，有些因使用有限尚未规定字母代号，有些正在考虑进行标准化。

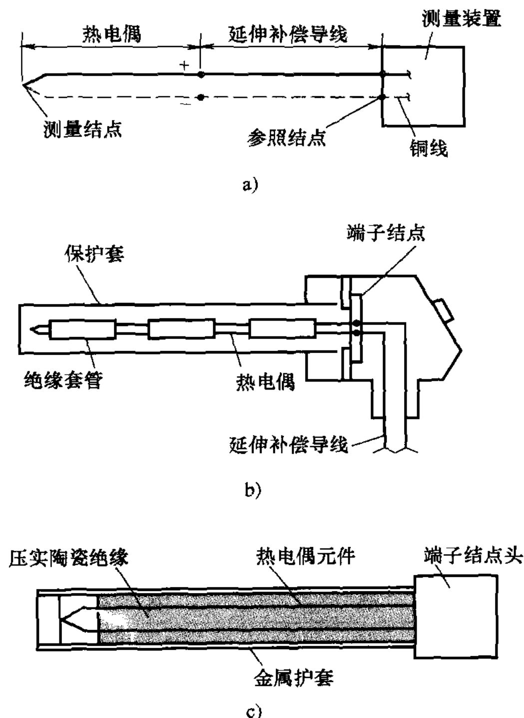


图3.14-24　简图表示

a) 基本热电偶电路(正、负符号代表相对于铂的正、负热电极)　b) 传统热电偶总成图　c) 压实陶瓷热电偶图

标准热电偶

表3.14-19展示了几种标准热电偶中各种热电偶的基本成分、熔点和电阻率。还列出其最高工作温度和在环境条件下的限制因素。

类型J热电偶。它应用广泛，主要由于其普遍性和低成本。在这种热电偶中，正热电极为铁(含有少量的碳、钴、锰和硅)，负热电极为康铜(constantan，一种44Ni-55Cu合金)。类型J可以应用于氧化和还原的两种气氛，温度高达约760℃(1400℉)。它们可以广泛应用于热处理，并它们能直接置于炉子的气氛中。

类型K热电偶。像J类型的热电偶一样，它们也广泛应用于工业用途里。正热电偶极为90Ni-9Cr合金，而负热电偶极为含有硅、锰、铝、铁和钴作为其合金组分的94% Ni合金。类型K热电偶能应用于温度高达1250℃(2280℉)的氧化气氛里。

类型K热电偶不应该应用于还原气氛或含有硫、氢或一氧化碳介质的高温用途里。在高温的氧化气氛中发生均匀的氧化，在正(90Ni-10Cr)热电极的表面

表3.14-19　标准热电偶的性能

类　型	热电极	基本成分	熔点/℃	电阻率/(nΩ·m)	推荐用途	最高温度 ℃	最高温度 ℉
J	JP	Fe	1450	100	氧化或还原	760	1400
	JN	44Ni-55Cu	1210	500			
K	KP	90Ni-9Cr	1350	700	氧化	1260	2300
	KN	94Ni-Al, Mn, Fe, Si, Co	1400	320			
N	NP	84Ni-14Cr-1.4Si	1410	930	氧化	1260	2300
	NN	95Ni-4.4Si-0.15Mg	1400	370			
T	TP	OFHC Cu	1083	17	氧化或还原	370	700
	TN	44Ni-55Cu	1210	500			
E	EP	90Ni-9Cr	1350	700	氧化	870	1600
	EN	44Ni-55Cu	1210	500			
R	RP	87Pt-13Rh	1860	196	氧化或惰性	1480	2700
	RN	Pt	1769	104			
S	SP	90Pt-10Rh	1850	189	氧化或惰性	1480	2700
	SN	Pt	1769	104			
B	BP	70Pt-30Rh	1927	190	氧化，真空或惰性	1700	3100
	BN	94Pt-6Rh	1826	175			

上形成的氧化物是一种尖晶石，即 $NiO\text{-}Cr_2O_3$。然而在还原气氛中发生铬的选择性氧化，生成的只是 Cr_2O_3。这种浅绿色氧化物(即普通所谓的“绿蚀”)的存在会消耗铬含量，造成热电势 emf 的一种非常大的负向转变并且使热电极快速劣变。

类型 N 热电偶。镍铬硅(Nicrosil)/镍硅(Nisil)热电偶(表3.14-19中类型N)适用于要求在高温中的耐氧化性和emf稳定性比类型K更强的用途里。正热电极为镍铬硅(名义成分14% Cr、1.3% Si、0.1% Mg及余量Ni)，而负热电极为镍硅(名义成分4.4% Si、0.1% Mg及余量Ni)。这些热电偶在实验室和多种工业用途的高温下具有比类型K热电偶更长的寿命和更好的emf稳定性。

类型 T 热电偶。广泛应用于低温测量。正热电极是无氧高电导率(OFHC)铜(C10100)。用于类型T热电偶的负热电极中的康铜(constantan，44Ni-55Cu)具有与类型J热电偶中所用康铜相同的基本成分，但是在微量的合金组分上稍有不同。类型T热电偶可以应用于氧化或还原的气氛中。由于铜的耐氧化性很差，故它们不应用于370℃(700℉)以上的温度里。

类型 E 热电偶。类型E热电极的正热电极为90Ni-9Cr，与类型K热电偶的相同；负热电极为44Ni-55Cu，与类型T热电偶的相同。类型E热电偶的推荐最高工作温度为870℃(1600℉)。就像类型K热电偶一样，类型E热电偶只能应用于氧化气氛中，因为它们在还原气氛中的使用会造成铬的选择性氧化(绿蚀)。

类型 S 热电偶。它能用于在从锑的凝固点(630.74℃或1167.33℉)到金的凝固点(1064.43或1947.97℉)的温度范围里定义1968年(于1975年经修订)国际实用温度刻度(International Practical Temperature Scale)的内插检定仪器。其特征是在高温氧化气氛中具有高度的化学惰性和稳定性。用于这种热电偶测脚的材料，Pt-10Rh和铂均有塑性并拉成细丝(特殊用途，其直径细至0.025mm或0.001in)。

在工业实验室里，类型S热电偶作为标准广泛用于对活性金属热电偶和其他温度传感仪器的标定。它普遍用于钢、玻璃和许多耐熔材料的工艺控制。它应当用于在空气中、氧化或惰性气氛中。不应当用于无保护的、存在着易于还原的氧化物时的还原气氛中，含有如铅和锌的金属蒸汽的气氛中，或含有如砷、磷或硫的非金属蒸汽的气氛中。它也不应直接插入金属保护管里，而且不推荐用于高温的真空里，除非只是很短的时期。由于这种热电偶的负测脚是用高纯度铂(一般工业用大约99.99%，特殊品级的为99.996%+)，故还要特别注意保护热电偶不受所用绝缘体以及工作环境的污染。

类型 R 热电偶。这种热电偶(Pt-13Rh/Pt)具有与

类型S热电偶相类似的特征和用途。

类型B热电偶。这种热电偶(Pt-30Rh/Pt-6Rh)能应用于静止的空气或惰性气氛中，而且长时期地处于在高达1700℃(3100℉)的温度中和间断性地处于1760℃(3200℉)的温度中(Pt-6Rh测脚的熔点约为1826℃或3319℉)。由于它的两个测脚均为铂铑合金，与类型R或类型S热电偶相比，类型B热电偶对于从绝缘体里或工作环境进入的微量杂质都较为不敏感。在相应的条件和环境下，类型B热电偶比类型R或类型S热电偶表现出较少的晶粒生长和标定的偏移。

类型B热电偶还适合于温度高达约1700℃(3100℉)真空里的短期使用。它不应用于还原气氛或含有金属或非金属蒸汽的气氛里，除非具有陶瓷保护管的适当保护。它一定不得直接插入金属的主保护管里。

非标准热电偶

19合金/20合金热电偶。它用于在高温的氢气或还原气氛中的温度检测和控制。正热电极是20合金，其名义成分为82Ni-18Mo。负热电极为19合金，其名义成分为99ni-1Co。

19合金/20合金热电偶可以应用于氢气或还原气氛并在从0～1260℃(32～2300℉)的整个温度范围里均有最佳功效。与标准型的类型K热电偶相比，19合金/20合金的耐氧化性并不好。故19合金/20合金热电偶不应当在高于650℃(1200℉)的氧化气氛中使用。

铱-铑热电偶。有三种工业上可用的铱铑热电偶：60Ir-40Rh/Ir(应用最广)、50Ir-50Rh/Ir和40Ir-60Rh/Ir。铱-铑热电偶适用于有限时间里的空气或其他含氧气氛里，温度高达约2000℃(3600℉)，并且一般应用于高于类型R、S和B热电偶所使用的温度范围里。它们能用于惰性气氛和真空，但不适合在还原气氛里使用。

铂-钼热电偶。Pt-5Mo/Pt-0.1Mo热电偶在中子辐射之下的适用温度范围从1100～约1500℃(2000～约2700℉)(类型K热电偶的使用温度高达1100℃)。

贵重金属(Platinel)热电偶。这是一种全贵重金属组合的热电偶。事实上，生产有两种组合：Platinel Ⅰ和Platinel Ⅱ。两者都有负测脚65Au-35Pd。Platinel Ⅰ热电偶的正测脚为83Pd-14Pt-3Au，而Platinel Ⅱ热电偶的正测脚由55PD-3/Pt-14Au(原文如此，疑为55Pd-31Pt-14Au之误——译者注)。贵重金属热电偶可应用于无保护(只有绝缘体)的空气，及温度达1200℃(2190℉)为较长的时间及温度达1300℃(2370℉)为较短的时间的应用。

钨-铼热电偶。有三种工业上可供使用的钨铼热电偶：W/W-26Re、掺杂W-3Re/W-25Re和W-5Re/W-26Re。所有这三种热电偶都能应用于高达2760℃(5000℉)的温度里，但是它们通常用于2315℃(4200℉)的温度以下。这些热电偶的使用仅限于在还原气氛、高真空和惰性气体中，因为有被氧化的趋向。

绝缘和保护

为了正常运行，热电偶丝除了测量结点以外，必须在全长上与另一根绝缘，还必须予以保护以免在运行环境中受损。

传统的热电偶组装。经绝缘的热电偶丝被封闭在保护管中。作为冷冻(低于0℃和低到大约4K)用途，热电极采用清漆或清漆类的涂层进行相互间的绝缘。在较高的温度(高至大约300℃)下，绝缘材料包括聚氯乙烯、热塑合成橡胶、尼龙、聚四氟乙烯和聚酰亚胺。超过300℃(570℉)则采用硬烧陶瓷。对于活性金属可用富铝红柱石(mullite)、矾土(alumina)和滑石(steatite)，根据温度和环境贵金属或非标准热电偶可以用石英、富铝红柱石、硅线石(sillimanite)、瓷料、氧化铝、氧化铍(beryllia)、二氧化钍(thoria)和二氧化铪(hafnia)。

经绝缘的热电偶元件是放在保护管或套管里使用的，以此获得机械支承和保护热电偶免遭工艺环境的损害。保护管是用金属(碳钢、铬钼合金钢、不锈钢和镍合金)或陶瓷材料(瓷料、矾土或碳化硅)制成的。套管也是金属的，用于在压力大于345kPa(50psi)的液体或气体介质中。

压实陶瓷热电偶。利用陶瓷粉末对热电偶丝进行绝缘(见图3.14-24c)。这种丝被压嵌在一个金属护套里面，以免遭环境的损害。选用的护套要满足特定的最终使用要求，包括300系列的奥氏体不锈钢、镍基合金(Hastelloy X和Inconel 600和702)以及钽和铌合金。根据温度和用途，氧化镁、氧化铝、氧化铍或二氧化钍都能用于这种绝缘。

精选参考文献

- T.P. Wang, Thermocouple Materials, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 869–888.

第7节 低膨胀合金

低膨胀合金是一种其尺寸不会随温度有明显变化的材料。这类合金包括不同的二元铁-镍合金和铁与镍-铬、镍-钴或钴-铬合金组合的几种三元合金。低膨胀合金应用于如大地测量用的测杆和卷尺、钟表上用的补偿摆锤和平衡轮、要求控制膨胀的移动零件(一些内燃机中的活塞)、双金属片、玻璃-金属间的密封、恒温片、用于储运液化天然气的槽罐和管道、电力输送的超导系统、集成电路的引线框架、无线电和其他电子装置中的元件以及光学和激光测量系统中的结构器件。

铁镍合金

铁和镍合金具有范围从小负值(-0.5ppm/℃)到大正值(20ppm/℃)的线膨胀系数。图3.14-25所示是在室温里镍含量对铁-镍合金的线膨胀系数的影响。在30%~60% Ni的范围里有可能选择到膨胀特征合适的合金。含36% Ni(以及少量的锰、硅和碳,它们总量不到1%)的合金即可以达到很低的膨胀系数,以致在普通的温度变化中其长度几乎不变。这种合金就是所谓的殷钢,即其商用名称为殷瓦(Invar)意为不变。

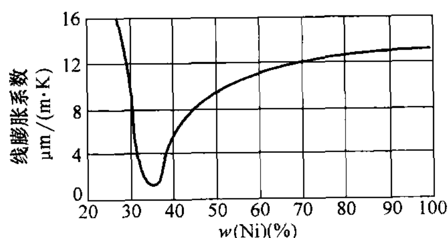


图3.14-25 铁-镍合金在20℃时的线膨胀系数与镍含量的关系

殷钢发现以后人们就致力于研究几种类似合金的热学性质和弹性。含镍量高于殷钢的铁-镍合金在一定程度上保留了殷钢的膨胀特性。而含量低于36% Ni的合金的膨胀系数远高于含量为36% Ni或以上合金的膨胀系数。

殷钢

殷钢(UNS编号K93601)及其有关的合金仅在一个相当窄的温度范围里具有低的膨胀系数(见图3.14-26)。在区域从A到B的低温范围里,膨胀系数是高的。在B到C的区间里,系数下降并在从C到D的区域里达到最小值。随温度的提高,系数再次从D提高到E,此后(从E到F)膨胀曲线所遵循的趋势有些类似于构成其合金的镍或铁。最小膨胀率仅仅处于从C到D的范围里。

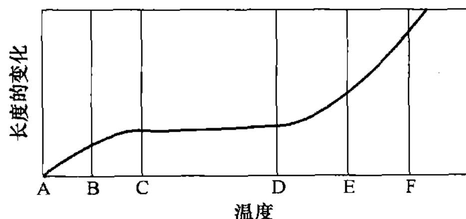


图3.14-26 典型的殷钢合金在不同温度范围里长度变化

图3.14-26中在D和E之间的区域里,系数很快地增加到一个较高的数值。经充分退火的36% Ni铁的温度极限是162℃和271℃(324℃和520℉)。这两个温度与材料中的磁性在最初和最终的损耗相对应(也就是居里温度)。于是,在C与D之间的曲线斜率就是在有限温度范围内对膨胀系数的测量。

表3.14-20列出了铁-镍合金在温度0和38℃(32和100℉)之间的线膨胀系数。在一个较宽温度范围里的多种铁-镍合金的膨胀特性由图3.14-27中的曲线1~5所代表。作为比较,图3.14-27还包括了普通钢的类似膨胀曲线。

表3.14-20 铁-镍合金在0和38℃之间的线膨胀

w(Ni)(%)	平均系数/[μm/(m·K)]
31.4	$3.395 + 0.00885t$
34.6	$1.373 + 0.00237t$
35.6	$0.877 + 0.00127t$
37.3	$3.457 - 0.00645t$
39.4	$5.357 - 0.00448t$
43.6	$7.992 - 0.00273t$
44.4	$8.508 - 0.00251t$
48.7	$9.901 - 0.00067t$
50.7	$9.984 + 0.00243t$
53.2	$10.045 + 0.00031t$

成分对膨胀系数的影响。图3.14-25出示了镍含量的变化对于线膨胀率的影响。最小膨胀率发生在大约为36% Ni的位置处,并且少量其他金属的加入会对这个最小膨胀率的位置产生相当大的影响。由于镍的进一步加入会提高合金失去其固有磁性的温度,膨胀曲线(见图3.14-26)上的拐点温度也随着含镍量的增加而提高。

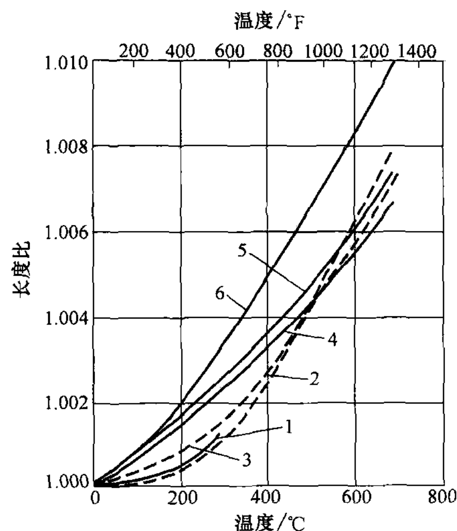
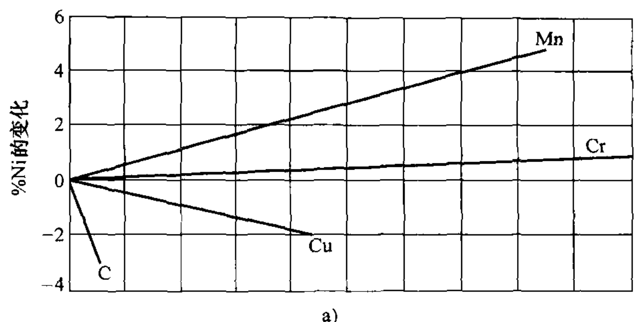


图 3.14-27 铁镍合金的线膨胀曲线。曲线 1，64Fe-31Ni-5Co；曲线 2，64Fe-36Ni（殷钢）；曲线 3，58Fe-42Ni；曲线 4，53Fe-47Ni；曲线 5，48Fe-52Ni；曲线 6，碳钢(0.25%C)



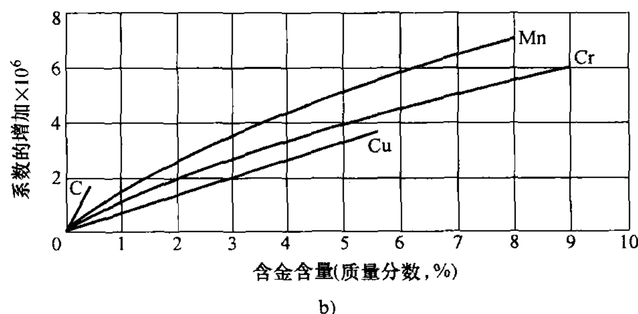


图 3.14-28 合金元素对铁镍合金膨胀特性的影响
a）因加入锰、铬、铜和碳而造成具有最小膨胀率的合金的镍含量偏移 b）因加入锰、铬、铜和碳而造成最小膨胀系数值的变化

加入铁-镍合金的第三种和第四种元素能使需要的(力学和物理)性能得到有益的改变，但是热膨胀特性的变化明显。当加入锰或铬时，最小膨胀率会朝含镍量较高的方向偏移；当加入铜、钴或碳时，它就朝含镍量较低的方向偏移。除了成分为 Ni-Fe-Co 的三元合金(超殷钢)以外，任何这类三元合金的最小膨胀率值一般都大于典型殷钢合金。

图 3.14-28 所示是加入锰、铬、铜和碳的影响。加入硅、钨和钼会产生类似于加入锰和铬所造成影响，最小膨胀率的成分朝含镍量较高的方向偏移。据称碳的加入会使殷钢产生不稳定性，这是由于在热处理的过程中碳在奥氏体基体里溶解度的变化所致。

工艺的影响。热处理和冷变形加工能相当程度上改变殷钢合金的膨胀率。表 3.14-21 表示热处理对于 36% Ni 殷钢合金的影响。经良好退火的材料所具有的膨胀率最大，而淬火材料则为最小。

表 3.14-21 热处理对殷钢的线膨胀系数的影响

状　态	平均系数/[μm/(m·K)]	状　态	平均系数/[μm/(m·K)]
锻造		**从 830℃(1530℉)淬火并回火**	
在 17～100℃(63～212℉)	1.66	在 16～100℃(65～212℉)	1.02
在 17～250℃(63～480℉)	3.11	在 16～250℃(65～480℉)	2.43
从 830℃(1530℉)淬火		**从 830℃(1530℉)淬火至室温保留 19h**	
在 18～100℃(65～212℉)	0.64	在 16～100℃(65～212℉)	2.01
在 18～250℃(65～480℉)	2.53	在 16～250℃(65～480℉)	2.89

退火是在 750～850℃(1380～1560℉)的温度中进行的。当合金从这个温度在水中淬火时，其膨胀率降低，但是会引起实际长度和膨胀系数的不稳定性。为了克服这些缺点并使材料稳定化，实践中常在约 315～425℃(600～800℉)的温度里消除应力并在 90℃(200℉)的低温中时效 24～48h。

冷拉也能降低殷钢合金的线膨胀系数。以下表中所列的是两个炉次的殷钢通过试验得到的数据：

材料状态	膨胀率/(×10⁻⁶/℃)
直接热轧而成	1.4(炉次1)
	1.4(炉次2)
退火和淬火	0.5(炉次1)
	0.8(炉次2)
淬火并冷拉(以直径3.2～6.4mm或0.125～0.250in的>70%的压缩量)	0.14(炉次1)
	0.3(炉次2)

淬火后，经过冷变形加工有可能使膨胀系数为零甚至为负值。通过在低温下的精心退火，能使负值的系数能提高到零。然而，这些能确保膨胀系数特别低的人工方法会造成材料的不稳定性。经过一段时间及温度的变化，特别低的系数又会回到正常值。对于特殊用途(如大地测量卷尺)，最重要的是将其从100～20℃(从212～68℉)经过许多个月的缓慢冷却，继之在室温中长期的时效，以此使材料稳定化。然而除非材料只限于在常规大气压下的温度变化范围内使用，否则这种稳定化是没有价值的。虽然这种热处理工艺上的改变对于特殊用途是很重要的，但是它们对于通常的使用几乎没有意义。

磁学性质。殷钢和所有类似的铁-镍合金在室温下都是铁磁性的。并在较高的温度下变成顺磁性。由于增加镍的含量会使合金固有磁性消失的温度升高，所以在膨胀曲线上的拐点温度将随含镍量的增加而提高。一种纯殷钢的完好的退火样品的磁性消失是从162℃(324℉)开始并于271℃(520℉)结束的。而对于其淬火样品的磁性消失，则从205℃(400℉)开始并于271℃(520℉)结束。

电学性质。36Ni-Fe殷钢的电阻在常温下介于750～850nΩ·m。在整个低膨胀范围里，电阻率的温度系数均约为1.2mΩ/Ω·K。当镍含量增加到超过36%并到大约80% NiFe时，其电阻率减小到约165nΩ·m。

其他物理和力学性能。表3.14-22列出了殷钢在热轧和锻造状态下的一些其他性质的数据。图3.14-29表示温度对于锻造66Fe-34Ni力学性能的影响。

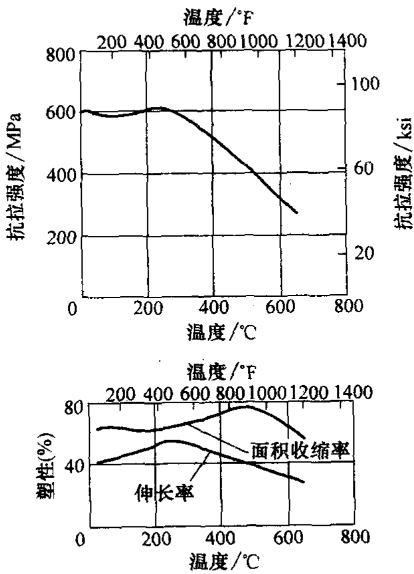


图3.14-29　锻造34%Ni合金的力学性能。合金成分：0.25C、0.55Mn、0.27Si、33.9Ni、余量Fe。热处理：退火800℃(1475℉)和炉冷

表3.14-22　殷钢的物理和力学性能

性能	数值	性能	数值
固相线温度/℃/(℉)	1425(2600)	弹性模量/GPa(10^6psi)	150(21.4)
密度/(g/cm³)	8.1	热弹性系数/[μm/(m·K)]	500
抗拉强度/MPa(ksi)	450～585(65～85)	比热容，在25～100℃(78～212℉)/{J/(kg·℃)[Btu/(lb·℉)]}	515(0.123)
屈服强度/MPa(ksi)	275～415(40～60)		
弹性极限/MPa(ksi)	140～205(20～30)	热导率，在20～100℃(68～212℉)/{W/(m·K)[Btu/(lb·h·℉)]}	11(6.4)
伸长率(%)	30～45		
断面收缩率(%)	55～70		
回跳硬度	19	温差电动势(相对于铜)，在-96(-140℉)，μV/K)	9.8
布氏硬度	160		

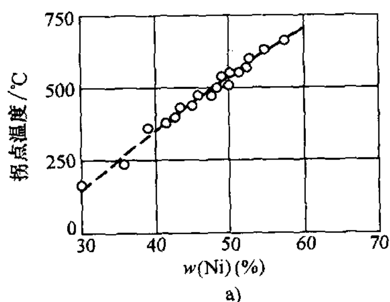
除殷钢外的铁-镍合金

镍含量高于殷钢的铁-镍合金，在一定程度上保留了殷钢的膨胀特征。由于进一步增加镍含量会提高合金固有磁性的消失温度，所以膨胀曲线上的拐点温度随着含镍量的增加而升高。虽然在一些情形里，

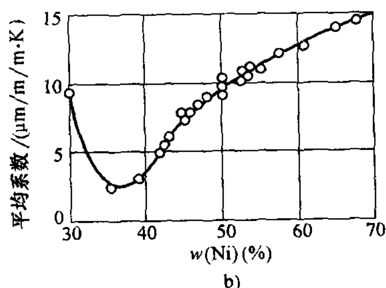
在一定范围内的这种增加是一个优点，但伴随而来的是其膨胀系数的增加。表3.14-23和图3.14-30列出了铁-镍合金的膨胀系数在高达其拐点温度下的数据。它们还给出合金含量高达68% Ni的有关数据。这些含有大约40%~50% Ni的合金如42% Ni铁（UNSK94200）和45% Ni铁（UNSK94500），还有玻璃密封合金如杜美（Dumet，UNS94101）和51% Ni铁、52% Ni铁都有重要的商业价值。

表3.14-23　铁-镍的膨胀特征

化学成分（质量分数，%）			拐点温度		从20℃到拐点温度的平均线膨胀系数	化学成分（质量分数，%）			拐点温度		从20℃到拐点温度的平均线膨胀系数
Mn	Si	Ni	℃	℉	/[μm/(m·K)]	Mn	Si	Ni	℃	℉	/[μm/(m·K)]
0.11	0.02	30.14	155	310	9.2	—	—	50.00	515	960	9.18
0.15	0.33	35.65	215	420	1.54	0.25	0.20	50.05	527	980	9.46
0.12	0.07	38.70	340	645	2.50	0.01	0.18	51.70	545	1015	9.61
0.24	0.03	41.88	375	710	4.85	0.03	0.16	52.10	550	1020	10.28
—	—	42.31	380	715	5.07	0.35	0.04	52.25	550	1020	10.09
—	—	43.01	410	770	5.71	0.05	0.03	53.40	580	1075	10.63
—	—	45.16	425	800	7.25	0.12	0.07	55.20	590	1095	11.36
0.35	—	45.22	425	800	6.75	0.25	0.05	57.81	—	—	12.24
0.24	0.11	46.00	465	870	7.61	0.22	0.07	60.60	—	—	12.78
—	—	47.37	465	870	8.04	0.18	0.04	64.87	—	—	13.62
0.09	0.03	48.10	497	925	8.79	0.00	0.05	67.98	—	—	14.37
0.75	0.00	49.90	500	930	8.84						



a)



b)

图3.14-30　镍含量对铁镍合金的膨胀系数的影响

a）拐点温度的变化

b）在室温与拐点温度之间平均膨胀系数的变化

特殊合金

Fe-Ni-Cr合金。 埃林瓦尔（Elinvar）铁-镍-铬合金是一种热弹系数（即在一很宽的温度范围里，弹性模量保持恒定）为零的52Fe-36Ni-12Cr合金。它用于像钟表中的游丝、平衡轮，和无线电同步技术中用的调谐拨叉等的一些零件上。其他含有40%~48% Ni和2%~8% Cr的Fe-Ni-Cr合金都是很有用的玻璃密封合金。

Fe-Ni-Co合金。 在一种殷钢的成分中，用钴替代一部分的镍能降低线膨胀系数，并且使合金的膨胀特征对不同的热处理较不敏感。一种这类合金就是含有名义32% Ni和4%~5% Co的超殷钢。其膨胀系数低于殷钢，但是覆盖的温度范围较窄。

柯伐（Kovar）铁-镍-钴合金（UNS 94610）是一种名义29% Ni-17% Co-54% Fe合金，它作为一种玻璃密封合金，以能用于硬玻璃（硼硅酸盐）的密封而闻名。柯伐的名义膨胀系数约为5ppm/℃和拐点温度为450℃（840℉）。

Fe-Co-Cr合金。 这是一种含有36.5%~37% Fe、53%~54.5% Co和9%~10% Cr的合金，它具有过低，有时甚至为负值（覆盖从0到100℃或32到212℉的温度范围）的膨胀系数。与无铬的低膨胀系数合金相

比，这种合金有很好的耐腐蚀性。因此，它被称之为“不锈殷钢”。

高强度、受控膨胀合金。这是一组通过加入铌和钛进行强化的 Fe-Ni-Co 合金，它们具有经析出硬化超合金的强度，而还保持 Fe-Ni-Co 系统中某些典型合金所具有的低线膨胀系数。表 3. 14-24 列出这些合金的成分和性能。其特别高的强度与低膨胀系数的组合，使此类合金适用于在某一温度范围里有精确的运行余裕度的用途里。在燃气轮机里，有数种零件都是用这种合金制造的。

表 3. 14-24　高强度受控膨胀合金的成分、热膨胀系数和室温里的拉伸性能

合金代号	UNS 编号	化学成分（质量分数,%）	从室温到以下温度的热膨胀系数						拐点温度		抗拉强度		0.2%条件屈服强度		伸长率（%）	断面收缩率（%）
			260℃（500℉）		370℃（700℉）		415℃（780℉）									
			ppm/℃	ppm/℉	ppm/℃	ppm/℉	ppm/℃	ppm/℉	℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi		
Incoloy 903 和 Pyromet CTX-1	N19903	0.03C，0.20Si，37.7Ni，16.0Co，1.75Ti，3.0(Nb + Ta)，1.0Al，0.0075B，余量 Fe	7.51	4.17	7.47	4.15	7.45	4.14	440	820	1480	215	1310	190	15	45
Incoloy 907 和 Pyromet CTX-3	N19907	0.06C 最大，0.5Si，38.0Ni，13.0Co，1.5Ti，4.8(Nb + Ta)，0.35Al 最大，0.012B 最大，余量 Fe	7.65	4.25	7.50	4.15	7.55	4.20	415	780	1170	170	825	120	15	25
ROloy 909 和 Pyromet CTX-909	N199009	0.06C 最大，0.40Si，38.0Ni，14.0Co，1.6Ti，4.9(Nb + Ta)，0.15Al 最大，0.012B 最大，余量 Fe	7.75	4.30	7.55	4.20	7.75	4.30	415	780	1310	190	1070	155	10	20

精选参考文献

- E.L. Frantz, Low-Expansion Alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 889–896.
- K.C. Russel and D. Smith, Ed., *Physical Metallurgy of Controlled Expansion Invar-Type Alloys*, The Metallurgical Society of AIME, 1989.

第 8 节　形状记忆合金

形状记忆合金(SMA)一词指的是这样的一类金属材料，当其经受适当的热变形加工工序后它们表现出恢复初始规定的形状和尺寸的能力。一般来说，这种金属在某一相对较低的温度中发生塑性变形，随后再暴露在某一较高的温度里就能恢复它们在变形前的形状。仅依据加热而表现出形状记忆的材料称为具有单向形状记忆。也有些材料若再度冷却还能经历形状的变化。这种材料具有双向形状记忆。

虽然已知有相当多种合金具有形状记忆的功效，但是只有能恢复相当大量的应变或能在改变形状上产生显著力的合金才具有商业价值。迄今为止，已有 NiTi 合金和含铜合金，如 Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni。

一种形状记忆合金可以进一步定义为一种能产生热弹性马氏体的合金。在这种情况下，合金经受下述的马氏体的相变，以此使合金在相变温度之下以一种形成双晶的机制发生变形。当双晶组织通过加热回复到母相时，其变形也就反向回复。

一般特征

发生在形状记忆合金中的马氏体相变会产生一种热弹性马氏体，它是由一种具有长程有序的高温奥氏体相演变而来的。这种马氏体典型地以交叉发生切变的小片出现，用显微镜观察像似一种人字形结构（见图 3. 14-31b）。这种相变为一级相变，这种相变并不出现在单一的温度下，而是在因各种合金系统而异的一个温度范围里发生。图 3. 14-31a 表示的是相变特征并能定义其转变历程中的每一点的一种方法。大部分的相变都发生在一个相对窄的温度范围里，尽管在加热和冷却的过程中相变的开始点和结束点实际上分

布在大得多的温度范围里延续。这种相变还表现为迟滞，加热和冷却过程的相变并不重叠（见图 3.14-31a）。这种相变的迟滞（如图 3.14-31a 中的 T 所表示）因合金系统而异。

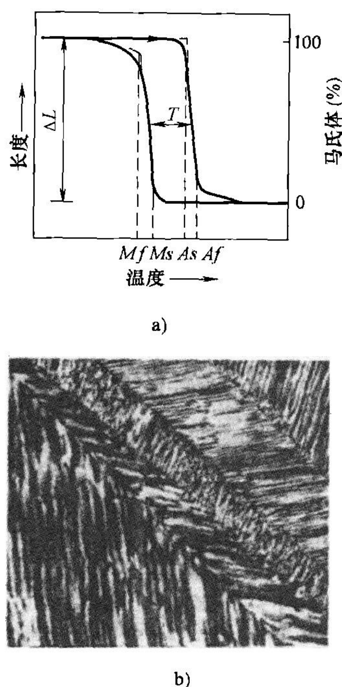


图 3.14-31　形状记忆合金的特征

a）一个试件在恒定的载荷（应力）的作用下，当将其冷却和加热时所得到的典型相变对温度的曲线。*T*，相变的滞后；*Ms*，马氏体开始；*Mf*，马氏体结束；*As*，奥氏体开始；*Af*，奥氏体结束

b）在铜铝、铜锡和铜锌合金中的典型马氏体组织

工业用 SMA 合金

NiTi 和铜基 SMA 合金的性质是十分不同。NiTi 合金有较大的形状记忆应变（高达 8%，而铜基合金为 4%~5%），往往有较大的热稳定性，具有极佳的耐腐蚀性，相比之下铜基合金只有中等的耐腐蚀性和应力腐蚀开裂敏感性，以及具有较高的塑性。相反，铜基合金较为便宜，易于在空气中熔化和挤压，并且具有较宽的潜在相变温度范围。

镍-钛合金

镍-钛合金系统的基础是 NiTi 的二元、等原子的金属间化合物（原子量百分数为 49%~51%）。这种金属间化合物是很特殊的，因为对于过量的镍或钛以及大多数其他金属元素，它都有中等的溶解度范围，而且相比大多数普通合金，它表现出较好的塑性。这种溶解度使通过与许多元素的合金化，用以改善力学性能和体系的相变性能。过量的镍，含量到 1% 左右是最为普通的添加量。过量的镍能大大降低相变温度和提高奥氏体的屈服强度。其他常用的元素有铁、铬（降低相变温度）和铜（减少迟滞和降低马氏体的变形应力）。由于普通的杂质如氧和碳也能改变相变温度，和降低力学性能，所以也要求尽量减少这些元素的含量。

性能。基础二元 NiTi 系统的主要物理性质和退火状态合金的某些力学性能如表 3.14-25 所示。注意，这适用于 *Af* 值约为 110℃（230℉）的等原子合金。在某些情形里，选择压缩量超过 50% 的加工硬化和适当的热处理能够大大提高马氏体变形的容易程度，由此获得一种强度更高的奥氏体，并形成使其自身通过加热和冷却而自发移动（双向形状记忆）的材料。应用这类合金的最大挑战之一就是开发适合的工艺规范，获得所要求的性能。

表 3.14-25　二元镍-钛形状记忆合金的性能

性　质	合适数值
熔化温度/℃（℉）	1300（2370）
密度/[g/cm³（lb/in³）]	6.45（0.233）
电阻率/（μΩ·cm）	
奥氏体	~100
马氏体	~70
热导率/{W/（m·℃）[Btu/（ft·h·℉）]}	
奥氏体	18（10）
马氏体	8.5（4.9）
耐腐蚀性	与 300 系列的不锈钢或钛合金相似
弹性模量/GPa（10psi）	
奥氏体	~83（~12）
马氏体	~28 至41（~4 至6）
屈服强度/MPa（ksi）	
奥氏体	195~690（28~100）
马氏体	70~140（10~20）
抗拉强度/MPa（ksi）	895（130）
相变温度/℃（℉）	−200~110（−325~230）
迟滞/Δ℃（Δ℉）	~30（~55）
相变潜热/{kJ/（kg·原子质量）[kcal/（g·原子质量）]}	167（40）
形状记忆应变	8.5% max

工艺。由于钛在这种合金中的反应能力，它们必须在真空或惰性气氛中全部熔化。像等离子电弧熔化、电子束熔化和真空感应熔化的方法均已进入工业应用。当锭块熔化后，标准的热成形工艺如锻造、棒材轧制和挤压都能用于初始开坯。这些合金与空气发生缓慢反应，故在空气中的热变形加工是十分成功的。大多数的冷变形加工工艺也能应用于这些合金，但是它们的冷作硬化极快，常要求进行退火。线材的拉拔也许是应用最广泛的技术，而且通常能拉出极佳的表面性能和尺寸小至0.05mm(0.002in)的线材。

常用500~800℃(950~1450℉)的热处理获得所要求的记忆形状，但是若时间允许也可以在低至300~350℃(600~650℉)的温度中处理。SMA的元件需要在热处理过程中对其所要记忆的形状进行约束，否则它无法保持其形状。

应用。NiTi合金的用途可以分为四大类：致动装置、受约束恢复的装置、超弹性装置和马氏体装置。

形状记忆触发装置在加热超过其相变温度的时候利用形状记忆功能恢复到特定形状。形状触发装置能不受约束地启动，以此自由地恢复其指定形状，也能完全受约束而产生一个力，或者能部分地受约束而因此做功。NiTi合金的相变温度能调整在精确要求的温度发挥作用。普通的动作温度如人的体温和水的沸腾温度。形状记忆致动装置的例子包括血液凝块过滤器（原文为“blood-cot filters”疑为“blood-clot filters”之误——译者注）(NiTi丝以一定的形状固定在静脉血管内用以捕获经过的凝块)、血管支架用以增强血管，以及咖啡壶的温度自动调节器。

作为受限恢复装置最为成功的例子是液压管线连接器。这种接头加工成圆柱形管套，并略小于它们所连接的金属管。于是，当它们作为马氏体时直径膨胀，而当加温成为奥氏体时它们的直径收缩并牢牢地固定在金属管的端部。金属管会阻止连接器完全恢复到制造时的形状，而当连接器力图恢复其形状时，所产生的应力足以构成一种在很多方面都比焊接更好的接头。

超弹性装置用于需要超常柔性NiTi的用途上。镍-钛具有吸收大量应变能量，并当作用应变撤销时又将其释放出来的能力。NiTi的弹性约是钢的十倍。镍-钛还有扭转性和抗扭结性，这对于医用引线是很重要的。进而，超弹性NiTi合金还能在一个很大的应变范围内提供一个恒定的力。它还被开发用于畸齿校正上(弓丝)，它以恒定力促使牙齿的移动并使患者感觉较为舒适。眼镜框是另一重要的超弹性用途。

NiTi的马氏体相具有某些独特的性能，使之成为许多用途的理想材料。首先，由于其双晶相结构的能量吸收特点，马氏体相的相变有极佳的阻尼特征。第二，NiTi的马氏体形式具有明显的耐疲劳性。最后，马氏体相易于变形，而当加热到它的相变温度以上时，将会恢复其形状。马氏体装置的应用例子包括震动缓冲器、用于心脏外科手术的可弯曲的外科工具，以及具有高耐疲劳性的线材。

铜基合金

成分和性能。三元Cu-Zn-Al和Cu-Al-Ni合金或它们含锰的四元改进型都可以作为工业用铜基形状记忆合金应用。锰能降低Cu-Zn-Al和Cu-Al-Ni两种合金的相变温度，并使共析转变移向较高的含铝量处。鉴于其较好的塑性，它常代替铝。为晶粒细化还要加入一些如硼、铈、钴、铁、钛、钒和锆的元素。Cu-Zn-Al合金的成分通常所处的范围为10%~30%(质量分数)Zn和5%~10%(质量分数)Al；Cu-Al-Ni合金含11%~14.5%(质量分数)Al和3%~5%(质量分数)Ni。马氏体相变温度可以通过改变化学成分而进行调整。表3.14-26所列的是铜基SMA的主要性能。

表3.14-26 铜基形状记忆合金的性能

性质	性质数值	
	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
热性质		
熔化温度/℃(℉)	950~1020 (1740~1870)	1000~1050 (1830~1920)
密度/[g/cm³(lb/in³)]	7.64(0.276)	7.12(0.257)
电阻率/(μΩ·cm)	8.5~9.7	11~13
热导率/{W/(m·℃) [Btu/(ft·h·℉)]}	120(69)	30~43 (17~25)
热容量/{J/(kg·℃) [Btu/(lb·℉)]}	400(0.96)	373~574 (0.089~0.138)
力学性能		
弹性模量/GPa(10psi)		
β相	72(10.4)[①]	85(12.3)[①]
马氏体	70(10.2)[①]	80(11.6)[①]
屈服强度/MPa(ksi)		
β相	350(51)	400(58)
马氏体	80(11.5)	130(19)
抗拉强度/MPa(ksi)	600(87)	500~800 (73~116)
形状记忆性质		
相变温度/℃(℉)	<120(250)	<200(390)
可恢复应变(%)	4	4
迟滞/Δ℃(Δ℉)	15~25 (30~45)	15~20 (30~35)

①在*Ms*和*As*相变温度之间定义形状记忆合金的弹性模量，变得困难。在这些温度里，这些合金表现为非线性弹性，其弹性模量同时取决于温度和应变。

工艺。铜基形状记忆合金的熔化类似于铝青铜。大部分的工业用合金都是用感应熔化。覆盖在金属熔液上面的保护熔剂和在浇铸过程中使用氮气或惰性气体遮蔽都是防止锌蒸发和铝氧化所不可缺少的。粉末冶金和快速凝固工艺也应用于生产细晶粒合金而无需添加晶粒细化添加剂。

铜基合金易于在空气里进行热变形加工。低含铝量(质量分数 <6%)的 Cu-Zn-Al 合金可以进行有工序间退火的冷精加工。而含铝量较高的合金的冷变形加工就没有那么容易了。与之相反，Cu-Al-Ni 合金在低温下是很脆的，只能进行热精加工。

由于铜基形状记忆合金在自然界是亚稳定的，所以在原始 β 相区的固溶热处理和后续的受控冷却对于保持 β 相的形状记忆功能是必不可少的。延长固溶热处理会造成锌的蒸发和晶粒的生长，故应予以避免。淬火工艺广泛采用水淬，但空气冷却对于某些高冷铝含量的 Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni 合金也是有效的。淬火的相变温度通常是不稳定的。为确立稳定的相变温度，一般有必要以高于名义 *Af* 温度进行的淬火后时效处理。

经快速并直接淬火成为马氏体相的 Cu-Zn-Al 合金容易受马氏体的稳定化影响。这种影响会造成逆向相变向较高温度方向变化。因此它将延迟并能完全阻止形状的恢复。对于 *Ms* 温度高于周围环境温度的合金而言，应当采用缓慢冷却或者在 β 母相状态下进行时效的分阶段淬火。

热稳定性。铜基合金的热稳定性最终受制于分解动力学。为此，应当避免 Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni 合金分别在高于 150℃(300℉)和 200℃(390℉)的温度中的长时间暴露。作为高温稳定性，一般 Cu-Al-Ni 是比 Cu-Zn-Al 更好的合金系统。然而甚至对于中温的用途，要求对相变温度有更严格的控制，这些影响还需进行评估。

应用。与前面所介绍的 NiTi 液压连接器相似，现已开发出用于铜和铝管件的 Cu-Zn-Al 连接器。在这种用途里，Cu-Zn-Al 形状记忆圆套在加热时发生收缩，并且如同一个驱动器使一个管形衬套压紧在所连接的管子里。涂在衬套上的密封胶可使连接强度得到增强。

Cu-Zn-Al 形状记忆合金还有在力致动装置方面的多种应用。一个例子就是消防安全阀，当发生火灾时，它借助 Cu-Zn-Al 致动器切断毒气或火焰的气流。

精选参考文献

- T.W. Duerig et al., Ed., *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann, London, 1990.
- T.W. Duerig and A.R. Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, in *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, R. Boyer, G. Welsch, and E.W. Collings, Ed., ASM International, 1994, p 1035–1048.
- H. Funakubo, Ed., *Shape Memory Alloys*, Gordon and Breach, 1988.
- D.E. Hodgson, M.H. Wu, and R.J. Biermann, Shape Memory Alloys, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 897–902.
- J. Perkins, Ed., *Shape Memory Effects in Alloys*, Plenum Press, 1975.

第9节　可熔性合金

可熔性合金包括一组含有铋、铅、锡、镉和铟的二元、三元、四元和五元合金。可熔性合金一词指的是所有一百多种能在相对低即低于锡-铅共晶焊料的熔点(183℃，或 360℉)的温度里熔化的白金属合金。这些合金的熔点温度范围低至 47℃(116℉)。可熔性合金应用于弯管中透镜封连、固定卡盘和夹具、在切削加工中固定薄截面零件如汽轮机叶片。按照特定熔点而制造的共晶可熔性合金可应用于温度控制装置以及如洒水喷头的消防装置等用途。

成分和性能

成分。工业上应用的许多可熔性合金都是以共晶成分为依据的(表 3.14-27)。在常温里，这种合金具有足够的强度将零件固定在一起，但是达到一定高的温度用于连接的可熔性合金将会熔化，于是拆开零

表 3.14-27　所选共晶可熔性合金的成分和熔化温度

化学成分(质量分数,%)					熔化温度	
Bi	Pb	Sn	Cd	其他	℃	℉
44.70	22.60	8.30	5.30	19.10In	47	117
49.00	18.00	12.00	—	21.00In	58	136
50.00	26.70	13.30	10.00	—	70	158
51.60	40.20	—	8.20	—	91.5	197
52.50	32.00	15.50	—	—	95	203
54.00	—	26.00	20.00	—	102.5	217
55.50	44.50	—	—	—	124	255
58.00	—	42.00	—	—	138.5	281
—	30.60	51.20	18.20	—	142	288
60.00	—	—	40.00	—	144	291
—	—	67.75	32.25	—	177	351
—	38.14	61.86	—	—	183	362
—	—	91.00	—	9.00Zn	199	390
—	—	96.00	—	3.50Ag	221	430
—	79.7	—	17.7	2.60Sb	236	457
—	87.0	—	—	13.00Sb	247	477

件。当消防洒水喷头达到危急的温度时，其连接就被熔化，从而使水从管线系统里喷洒出来浇灭火焰。锅炉熔塞和燃烧炉控制器也有类似的作用，因为当温度升高超过锅炉或燃烧炉的安全极限时，其熔塞将在运行中熔化。当可熔性合金的连接熔化锅炉里的压力或热量逃逸时，燃料的供给就此中断，从而使运行复原到一个安全的水平上。

每一种共晶合金都有其特定的温度，除此之外还有许多非共晶合金能在一个温度范围内熔化。表3.14-28所示是所选的非共晶合金成分。

表3.14-28 所选非共晶可熔性合金的成分、屈服温度和熔化温度

化学成分(质量分数,%)					屈服温度		熔化温度	
Bi	Pb	Sn	Cd	其他	℃	℉	℃	℉
50.50	27.8	12.40	9.30	—	70.5	159	70~73	158~163
50.00	34.5	9.30	6.20	—	72	162	70~79	158~174
50.72	30.91	14.97	3.40	—	12.5	163	70~84	158~183
42.50	37.70	11.30	8.50	—	12.5	163	70~90	158~194
35.10	36.40	19.06	9.44	—	75	167	70~101	158~214
56.00	22.00	22.00	—	—	96	205	95~104	203~219
67.00	16.00	17.00	—	—	96	205	95~149	203~300
33.33	33.34	33.33	—	—	101	214	101~143	214~289
48.00	28.50	14.50	—	9.00Sb	116	241	103~227	217~440
40.00	—	60.00	—	—	150	302	138~170	281~338
48.0	25.63	12.77	9.60	—	—	—	61~65	142~149

具有宽熔化温度范围的可熔性合金可用于标杆或标管的装配上，因为合金即使熔化还能沿零件的表面分布，而且凝固后仍然能坚固地固结其上面。、

可熔性合金的性能。可熔性合金是可时效的，故而它们的力学性能取决于浇铸后到冷却所经过的时间，以及浇铸的条件和凝固的速度。试验条件也会影响力学性能的数值。例如，许多可熔性合金在遭受突然的冲击时会表现出脆性，但是在缓慢的应变速率下却能展现很高的塑性。

某些合金经过凝固后因冷却而发生的正常热收缩能通过时效而产生的膨胀从而得到部分、全部甚至过度的补偿。例如，含有33%~66% Pb的铋合金，在凝固后由于时效而会表现出净膨胀。一些可熔性合金表现不出任何收缩(缩减)，而在静态的温热中快速膨胀；另一些在凝固之后的开始几分钟里略有收缩，随后开始膨胀；而还有一些要等到其可熔性合金铸件冷却到室温之后的某一时刻才开始膨胀。

净膨胀、净收缩和极少或无变化三种中的每一种特征，根据用途都各有其优势。如用于造型的木模尺寸必须比用以浇铸的铸件所需要的尺寸要略微大一点，以此补偿铸件在凝固和冷却到室温时的收缩。而用于铸造金属型的原始木模则需要有两倍这样的放大裕量，除非金属型是零收缩的。具有共晶成分的可熔性合金常用于通过原始木模制造的铸件金属型，因为它们总会有点增大，这点增大仅够其生产铸件清理的需要而不会使尺寸缩小到要求的数值以下。当一个金属零件被牢牢地夹在车床的卡盘上时，可熔性合金的这种增大特性常常对使用有好处。零件切削后再将可熔性合金熔化掉。

可熔性合金尽管在长时间的应力作用下会产生一些变形，但是一般来说其承载能力还是不错的。此外，许多可熔性合金的硬度和力学性能都会逐渐随时间而发生改变，也许是因为影响增大或收缩的时效而造成同样的显微组织变化。

低熔点、可熔性合金焊料。它们含有(质量分数)44.7%~58% Bi(表3.14.27中的共晶成分)，应用于与对温度敏感的基体或装置有关的软钎焊工艺，以及为了保护附近钎焊焊缝而必须采用的低温分步软钎焊工序。它们的这种在低温下熔化的能力，使之成为以下用途的理想材料：

- 温度过载装置的制造，如安全连接、熔断丝和熔塞，它们在装配过程中的接触正压力过于不相同或难以保持一致；
- 软钎焊用的低温合金如白镴(锡基合金)；
- 非常厚的多层印刷电路板的穿孔锡焊所使用的软钎焊机焊工序；

- 装配工序，如集成电路组件上的表面安装，在常规锡-铅焊所要求的温度里其安装容易遭受热损伤；
- 采用注塑电路板的装配工序，其玻璃态转化温度对于使用锡-铅合金不够高。

精选参考文献

- L.G. Stevens and C.E.T. White, Indium and Bismuth, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 750–757.

第10节　表面硬化合金

表面硬化可以广义地定义为耐磨材料借助于堆焊或热喷涂工艺以一定的厚度应用于零件的易损伤(或遭磨损)的表面。本文仅论述用于耐磨损的堆焊材料，热喷涂材料可参阅本手册的“表面工程”一章。

表面硬化在磨损控制上的应用非常广泛，范围从非常严重的磨料磨损用途例如岩石破碎和磨碎(金属对泥土的用途/磨损)到将金属对金属的磨损降低到最低限度的用途例如控制阀只允许千分之几吋磨损。表面硬化用于控制磨磨料磨损，如磨锤、挖掘工具、挤压螺杆、裁剪刀片、装载设备的零件、球磨机及破碎机的零件。它还用于控制无润滑或少润滑的金属与金属的滑动接触，如控制阀、拖拉机和挖土机的履带零件及高性能轴承。

表面硬化还应用于控制磨损与腐蚀的组合，例如常见的泥浆阀座、犁、食品加工业用的刀具以及用于腐蚀性液体和稀浆的阀及泵。在大多数的情形里，其零件是用碳素钢或不锈钢制造的，但仅靠这些材料还不足以满足其耐磨的要求。

除此之外，表面硬化合金适用于一些崭新设备或零件整修时的关键磨损部位。被称为熔敷合金的这些合金的开发并非只是用于耐磨，而更是用以使经磨损的零件恢复或接近到原始尺寸，并且/或者就是为以后更加耐磨的表面硬化合金涂层提供适当的支承。

表面硬化材料

表面硬化材料包括多种多样合金、碳化物以及这些材料的组合物。传统的表面硬化材料通常分类为钢或低合金钢材料、高铬白口铁或高合金钢材料、碳化物、镍基合金或钴基合金。有时一些铜基合金也能用于表面硬化的用途上，但是大部分的零件都使用含铁、镍或钴基的表面硬化合金。

使用表面硬化材料可以借助于多种焊敷工艺。包括从传统的(如氧炔焊炬)到最新开发的工艺像等离子弧堆焊。为了适应这些不同的覆盖工艺，表面硬化材料可以有不同的形态。最常用的工艺以及与各种工艺最为相关的材料形态有：

焊敷覆盖工艺	可消耗的材料形态
氧炔	裸铸或空心棒
金属保护电弧焊(SMA)	涂层的实心或空心棒(棒电极)
钨极气体保护电弧焊(GTA)	裸铸或空心棒
金属气体保护电弧焊(GMA)	空心或实心线
敞开式电弧焊	空心线(熔剂芯)
水下电弧焊	空心或实心线
等离子弧堆焊(PTA)	粉末

在选择所用的工艺时，以下的因素是很重要的：
- 沉积速率；
- 稀释程度(level of dilution)(在焊敷过程中，混合于覆盖材料中的衬底材料的量)；
- 设备的可移动性。

为了克服稀释对磨损特性的影响，常采用多层的表面硬化。

从显微组织看，表面硬化合金一般由粘结在较软的铁、镍或钴基的合金基体中的硬相沉积物，如硼化物、碳化物或金属间化合物所构成。碳化物在铁-和钴-基的表面硬化合金中的各种硬相中占有优势。铁和钴基的表面硬化合金中的含碳量范围一般高达4%(质量分数)。硼化物以及碳化物是镍基表面硬化合金中主要的硬相。碳和硼的组合含量一般范围高达5%(质量分数)。形成特定相的碳化物和/或硼化物是由基体中加入的合金所决定的。在大多数的钴、镍基以及高合金、铁基的表面硬化合金中，基体合金一般含有分别高达35% Cr、30% Mo 和13% W，还有较少量的硅和锰。

铁基合金

铁基表面硬化合金比钴和/或镍基表面硬化合金应用较为广泛，而且构成表面硬化合金中的最大用量。铁基表面硬化合金不仅成本低，而且能在很大的范围里提供所需要的性能。大部分遭受严重磨损的设备如破碎和碾磨设备以及装载设备，通常都是非常庞大和笨重的。经受磨损的零件通常需要停机维修。为此，都要试着以最低的成本和最可行的材料对其进行表面硬化处理。于是，如今实际上有数百种的铁基表面硬化合金在使用。

由于涉及的合金数量繁多，铁基表面硬化合金最好按照它们对于不同类型磨损的适应性和它们的显微组织，而不是按化学成分进行分类。大多数的铁基表面硬化合金分为以下几大类：

- 珠光体钢；
- 奥氏体（锰）钢；
- 马氏体钢；
- 高合金铁；
- 奥氏体不锈钢。

珠光体钢。这主要为低合金钢并有微小的成分调整以此获得可焊敷性。这种合金含有低碳（<0.2% C）和少量的其他合金元素（例如达2% Cr），以此形成珠光体组织。珠光体钢对于堆积覆盖层是很有用的。主要用于修复碳钢或低合金钢的机器零件使之达到原先的尺寸。通常，这组合金有耐冲击性和低硬度（范围为25~37HRC）和极佳的焊敷性能。表3.14-29所列是用于堆焊用途的典型低合金珠光体钢（EFe1）的成分和性能。

表3.14-29 用于堆焊覆盖层的珠光体低合金钢（EFe1）、奥氏体锰钢（EFeMn-C和EFeMn-Cr）和用于金属对金属磨损用途的空气硬化的马氏体钢的成分、硬度和磨料磨损数据

合金	化学成分（质量分数，%）							硬度HRC	磨料磨损，体积磨料磨损			
									低应力①		高应力②	
	Fe	Cr	C	Si	Mn	Mo	Ni		mm^3	$in^3\times10^{-3}$	mm^3	$in^3\times10^{-3}$
堆焊覆盖层												
EFe1③	余量	2	0.1	1.0	1	1.5	—	37	88	5.4	49	3.0
EFeMn-C③	余量	4	0.8	1.3	14	—	4	18	65	4.0	57	3.5
EFeMn-Cr③	余量	15	0.5	1.3	15	2.0	1	24	93	5.7	46	2.8
金属对金属焊敷层												
EFe2③	余量	3	0.2	1.0	1	1.0	1	48	54	3.3	66	4.0
EFe3③	余量	6	0.7	1.0	1	1.0	—	59	60	3.7	68	4.1
ER420④	余量	12	0.3	1.0	2	—	—	45	84	5.1	62	3.8

①干砂/橡胶轮试验（ASTM G65，程序B）：载荷13.6kg（30lb），200r。 ②砂浆/钢轮试验（ASTM B611，修订）：载荷22.7kg（50lb），250r。 ③双层保护金属弧焊沉积工艺。 ④双层水中浸没弧焊沉积工艺。

奥氏体（锰钢）。这是仅次于Hadfield钢的一种典型用钢。此类中，大部分的工业上可用合金钢都能大致细分为低铬和高铬合金钢。

低铬合金钢通常含有高至4% Cr、12%~15% Mn和一些镍或钼（表3.14-29）。低铬奥氏体锰钢一般用于堆敷承受高冲击载荷的锰钢机器零件（冲击破碎机或挖土机铲齿）。

高铬奥氏体钢除了大约15% Mn外，通常还含有12%~17% Cr，应用于奥氏体锰钢以及碳钢与低合金钢的堆焊和连接。此外，高铬钢的沉积后的硬度（~24HRC）高于低铬钢的（~18HRC）。用于堆焊用途的奥氏体锰钢表面硬化合金的成分和性能如表3.14-29所示。

马氏体钢。这是一种焊敷沉积经过在正常的空气中冷却后形成马氏体。因此这种钢常被赋名为“自硬化”或“空气硬化”，它们像工具钢一样具有范围从45~60HRC的硬度。马氏体钢的含碳量范围可高达0.7%。添加其他元素如钼、钨、镍和铬（高达12%），以提高其淬硬性和强度，并促使马氏体的形成。锰和硅的加入有助于提高焊敷性。表3.14-29列出了马氏体钢的成分和性能。

马氏体钢的主要表面硬化用途包括无润滑的金属对金属的滚动或滑动零件。马氏体钢的耐冲击性不如珠光体或奥氏体合金，但是它们在提高硬度和耐磨料磨损性方面得到了补偿性的提高。

在严酷的环境里，较高的镍含量是有益的。AWS ER420及其改进型含有镍、钼和铌（或钒），因此它们也是高温和中等程度的腐蚀环境中的必然选择。已经发现，ER420和EFe3都适合用于轧钢机的热轧辊上（它们要求有相当的热硬度、耐氧化性和耐热疲劳性）。

高铬铁。它们包含着很大的成分范围，其铬的含量范围约为6%~35%（质量分数），而碳约为2%~6%（质量分数）。其他可能的添加合金包括钼、锰和硅。表3.14-30列出了其典型的成分。

至少从磨损的观点来看，作为高铬铁中最重要的显微组织特点应是一种用M_7C_3代表的碳化物，它是在固化的过程中大量形成并含有铬、铁和（如果有的

表3.14-30　用于金属对泥土磨料磨损用途的高铬白铁成分

合金	化学成分(质量分数,%)							
	Cr	C	Si	Mn	Mo	Ni	B	Fe
ERFeCr-A3	11	2.6	1.3	1.8	1.5	—	—	余量
ERFeCr-A4 (Mod)	29	3.5	1.1	0.9	—	2.6	0.7	余量
ERFeCr-A2	28	4.3	0.8	1.7	1.4	—	—	余量

话)钼。围绕这些碳化物颗粒的基体可以是奥氏体、珠光体或马氏体。

至于高铬磨料磨损合金的工业应用，低碳(2%~3%C)亚共晶体材料通常被选用于有中等程度的磨料磨损和冲击的工况里，而较高碳(4%~6%C)的过共晶体合金应用于有严重磨料磨损并很少有或没有冲击的用途里。高铬铁的硬度范围一般为52~62HRC。

奥氏体不锈钢。这种表面硬化合金的开发可以认为是一种如后面所介绍的钴基合金的替代材料。它们表现出相似的抗擦伤特征并具有相同的耐气蚀特性。其中一些已开发用于一般用途和其他特殊用途。例如，表3.14-31所列的无钴合成材料应用于表面硬化的核电站级阀门(从钴表面硬化磨损颗粒中产生的Co^{60}会造成辐射性的危害)。钴基的奥氏体牌号(表3.14-31)已在水电站的水轮机中用于气蚀损坏的修复。

表3.14-31　奥氏体不锈钢表面硬化合金的名义成分

合金	化学成分(质量分数,%)								
	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	Co	N	Fe
NOREM①	0.7~1.3	24~26	5~12	2.5~5	5~9	—	1.7~2.3	0.05~0.24	余量
IRECA②	0.2	17~19	9~10	2~3	—	9~10	—	0.2	余量

①由电力研究所开发。　②由 Hydro-Québec 开发。IRECA 表示经改进的耐气蚀性。

非铁合金

非铁表面硬化合金在应用中能耐严重的特种类型磨损(非磨料磨损)或在过度腐蚀的或超过铁合金使用温度的环境中所发生的磨损(含磨料磨损)。钴基合金和青铜特别能耐擦伤和耐一些涉及劣化机制(如气蚀)的显微疲劳的磨损。钴基合金在超过750℃(1380℉)的温度里具有很高的抗变形特性。表3.14-32列出非铁表面硬化合金的典型成分。

钴基/碳化物型合金。不同钴基/碳化物型合金之

表3.14-32　所选非铁表面硬化合金的成分

合金	化学成分(质量分数,%)										
	Fe	Cr	Mo	W	Si	C	B	Al	Cu	Co	Ni
钴基/碳化物型											
ERCoCr-A	—	28	—	5	—	1.2	—	—	—	余量	—
ERCoCr-B	—	29	—	8	—	1.5	—	—	—	余量	—
ERCoCr-C	—	31	—	13	—	2.5	—	—	—	余量	—
ERCoCr-E	—	27	6	—	—	0.2	—	—	—	余量	—
钴基和镍基/拉夫斯(Laves)型											
T-400	—	9	29	—	2.5	—	—	—	—	余量	—
T-700	—	16	33	—	3.5	—	—	—	—	—	余量
T-800	—	18	29	—	3.5	—	—	—	—	余量	—
镍基/硼化物型											
合金40	1.5	7.5	—	—	3.5	0.3	1.5	—	—	—	余量
ERNiCr-B	3	11	—	—	4	0.5	2.5	—	—	—	余量
ERNiCr-C	4	16	—	—	4	0.7	3.5	—	—	—	余量
铝青铜型											
ECuAl-B	4	—	—	—	1.0	—	—	9	余量	—	—
ECuAl-D	4	—	—	—	—	—	—	13.5	余量	—	—

间的主要差别在于其含碳量（由此而具有的碳化物的体积百分比、室温硬度和耐磨料磨损的程度）。富铬-的 M_7C_3 是这些合金中的一种主要碳化物，尽管富钨-的 M_6C 在这些高含钨量的合金中也有显著地位，并且富铬-的 $M_{23}C_6$ 在低碳合金中也很普遍。钴基/碳化物型合金的硬度值范围约为 40～55HRC。如图 3.14-32 所示，这些合金（ERCoCr-A、-B、-C 和-E）的耐磨料磨损性随其含碳量的增加而提高。

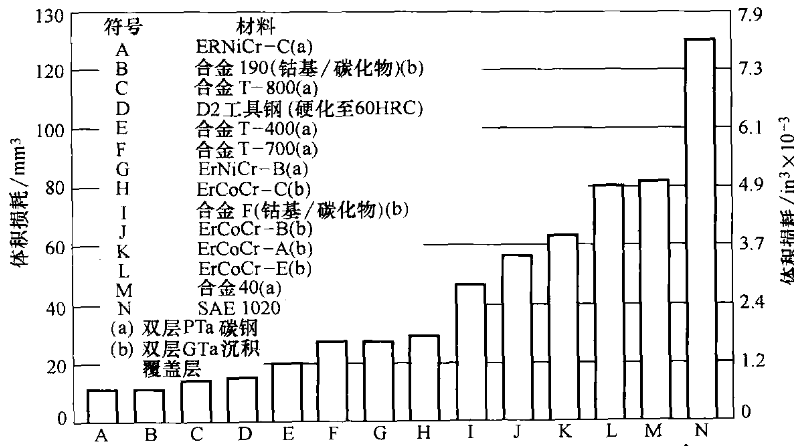


图 3.14-32　采用 ASTM G65 的低应力、磨料磨损试验，非铁表面硬化合金以工具钢和碳钢为参照的比较。G65 试验参数：程序 B，室温，13.6kg(30lb) 载荷，硅砂颗粒直径为 212～300μm，200r/min 经历 2000r，进给率 390g/min(0.86lb/min)

拉夫斯（Laves）相合金成分。拉夫斯相是一种拓扑密堆相金属间化合物。历史上，冶金学家曾由于拉夫斯相对力学性能的不利影响而避免它的出现。到了 20 世纪 60 年代，人们才发现拉夫斯相在金属对金属磨损方面的好处，从而含有拉夫斯相的合金具有了商业上的价值。

如同表 3.14-32 所示有两种拉夫斯相的钴基合金（Co-29Mo-9Cr-2.5Si 和 Co-29Mo-18Cr-3.5Si）可以应用于表面硬化的用途上。这两种合金都至少含有（体积分数）50% 拉夫斯相。拉夫斯相的硬度值介于 1000～1200DPH，它低于碳化物。于是，含拉夫斯相的合金在金属对金属的磨损工况里，对于所匹配的材料不如含碳化物的合金那么耐磨料磨损。

钴基的拉夫斯相合金的硬度值范围为 54～64HRC。镍基拉夫斯相合金（如表 3.14-32 中所列的 Ni-33Mo-16Cr-3.5Si）的名义宏观硬度为 45HRC。拉夫斯相合金的磨料磨损数据如图 3.14-32 所示。虽然这些合金都是用焊敷技术进行沉积的，但是它们更多地还是用热喷涂方法。

镍基/硼化物型合金成分。这种合金成分代表了在铁、铬、硼和碳的含量（表 3.14-32）方面的进步。铁含量多半是伴随性的，使二价铁化合物能在制造过程中得以应用。其他三种元素与镍一起在凝固过程中决定了硬化相在组织中的含量和种类，硼是形成硬化相的主要元素。含硼镍合金的硬度值范围为 51～57HRC。

由于硼化物和碳化物在其显微组织中的弥散分布，镍基/硼化物型合金表现出优异的耐磨料磨损性（见图 3.14-32 所示的 ERNiCr-C、ERNiCr-B 和合金 40）。低应力的耐磨料磨损性一般随硼和碳的含量增加而提高，因此这些材料的硬相体积比也会提高。虽然它们的性能在自匹配的滑动工况中不如钴基材料，但是镍基/硼化物型合金具有中等的耐擦伤能力。在这些非铁材料中，镍基/硼化物型合金的耐腐蚀性最弱。这是由于基体中缺少铬。

青铜型。表 3.14-32 的铝青铜类中有两种青铜成分。硅和其他类型青铜也能以焊敷熔化的形式进行表面硬化。

采用铝青铜保护的典型零件包括齿轮、凸轮和冷拉/成形模。这些合金并不推荐用于高温，因为当温度 >200℃（>390℉）时，它们的力学性能会大为降低。

碳化钨

与其他焊敷覆盖材料形成对照的是，碳化钨的复合材料并不依赖于在焊敷熔池凝固过程中所形成的适当硬化相。其覆盖层材料所依赖的是碳化钨颗粒从焊敷熔化物（在一钢管中插入的碳化物）到覆盖层的转化。因此为了防止碳化钨颗粒的熔化，重要的是要限制在焊敷中所输入的热量。如果碳化钨颗粒发生熔化，它们就会与铁相混合生成软得多的铁-碳化钨，从而降低其耐磨料磨损性。为此，氧炔沉积通常比电

弧焊敷碳化物覆盖层表现出更高的磨料磨损性。

碳化钨复合材料的优势就是覆盖层中的硬颗粒大小是能够控制的。这是很重要的，因为耐磨料磨损性取决于显微组织特征（如碳化物）与碾磨颗粒之间的大小关系。如果碾磨颗粒比显微组织的颗粒更大，那么经过一段磨合期（这时表面上较软的基体材料会被磨掉）之后，碾磨颗粒就会悬浮在硬化显微组织的露头上面。相反，如果碾磨颗粒比显微组织的颗粒更小，显微组织颗粒周围的基体材料就有被磨损的可能。最终使它们脱落下来，从而只能在耐磨料磨损中起到很小的作用。

多种碳化钨复合材料具有各种不同管状生成物形态。常见的复合材料为 38%、50%、55% 和 60%（质量分数）的碳化钨，其余量为碳钢管。对于每一种成分都有若干种的碳化钨大小范围。例如，作为 60% 的 WC 氧炔焊敷熔化物，有四种筛目大小范围：

AWS 代号	筛目大小范围
RWC-12/20	12 ~ 20
RWC-20/30	20 ~ 30
RWC-30/40	30 ~ 40
RWC-40/120	40 ~ 120

用于保护金属极电弧焊接（SMAW）的外涂熔剂焊条和用于敞开电弧焊的连续焊丝（内部熔剂）都可以有相同的成分。

碳化钨复合材料一般都有非常高的耐磨料磨损性和非常低的冲击强度。在一个给定的工况下，性能取决于：①碳化物占有的体积比；②碳化物与磨粒介质之间的大小关系；③所使用的焊接技术。重要的因素是覆盖层中的碳化物分布（由于颗粒趋于沉降，而焊敷熔池中的搅动是有利的）以及在焊敷过程中钢基体里的碳化物溶解和再析出的数量。冲击强度一般随碳化物的体积比的增加而降低。

碳化钨复合材料已用于解决种类繁多的工业滑动和钻削中的磨料磨损问题。表 3.14-33 列出了磨料磨损的数据。在极端严酷的环境里可以应用某些非铁碳化物（制成裸铸棒形式的钴、镍基产品）。还可以利用一些其他碳化物（如钒、钛或铌）的多种替代复合材料，其优点是由于其较低的密度而形成更为均质的沉积。

表 3.14-33 碳化钨复合材料的磨料磨损数据

材料		磨料磨损，体积损耗			
碳化物（质量分数，%）	筛目大小	低应力①		高应力②	
		mm^3	$in^3 \times 10^{-3}$	mm^3	$in^3 \times 10^{-3}$
60	20 ~ 30	7.3	0.45	28.7	1.75
61	100 ~ 250	10.6	0.65	24.4	1.49

①干砂/橡胶轮试验（ASTM G65 程序 B）：载荷 13.6kg（30lb），2000r。 ②砂浆/钢轮试验（ASTM B611 修订）：载荷 22.7kg（50lb），250r。

精选参考文献

- P. Crook and H.N. Farmer, Friction and Wear of Hardfacing Alloys, *Friction, Lubrication, and Wear Technology,* Vol 18, *ASM Handbook,* ASM International, 1992, p 758–765.
- J.R. Davis, Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining, *Welding, Brazing, and Soldering,* Vol 6, *ASM Handbook,* ASM International, 1993, p 789–828.

第 11 节 金属基体复合材料

金属基体复合材料（MMC）是一种在名目多的结构和热控制调节方面有广泛应用潜力的材料。金属基体复合材料所能提供的工作极限温度高于与之对应的基体金属，而且通过改造能提高它们的强度、刚度、热导率、耐磨料磨损性、抗蠕变性或尺寸稳定性。与聚合物基体复合材料不同，它们还具有阻燃性，也不会在真空中脱气，而且遭受有机流体如燃料和溶剂的腐蚀也最小。

在一种 MMC 中，基体相是一种单一合金（通常为低密度非铁合金），其增强剂由高性能的碳、金属或陶瓷添加剂组成。增强金属间化合物如钛、镍和铁的铝化物也正在开发中。无论以连续或断续为特征的增强剂都是由（体积分数）10% 至 70% 的复合材料构成。连续的纤维或细丝（f）增强剂包括石墨、碳化硅（SiC）、硼、氧化铝（Al_2O_3）和难熔金属。断续增强剂主要由须状（w）的 SiC、微粒状（p）的 SiC、Al_2O_3 和二硼化钛（TiB_2）组成，还有短的或切断的 Al_2O_3 或石墨的纤维（c）。

铝基体复合材料

有关 MMC 的大部分工业化工作都集中在作为基体金属的铝。由于重量轻、环境的适应性和良好力学性能的结合使铝合金非常普遍，这些性能还使铝能很好地作为基体金属使用。铝有足够高的熔点以满足许多使用要求，然而又有足够低的熔点使复合材料的制造具有合理的便利性。铝还能适应各种不同的增强剂。虽然很多早期有关铝 MMC 的工作都致力于连续纤维的类型，但是现在的许多工作则都集中在断续增强（微粒或须状）的铝 MMC，这是由于它们较为容易制造、较低的生产成本以及相对的各向同性性能。然而如图 3.14-33 所示，性能较高的复合材料都是用较

为昂贵的连续纤维增强剂进行生产的。而微粒增强熔化(或铸造)金属复合材料则成为成本/性能范围里的另一端。作为价格适中的还包括利用预成形坯浸渗和粉末冶金(P/M)技术所生产的复合材料。

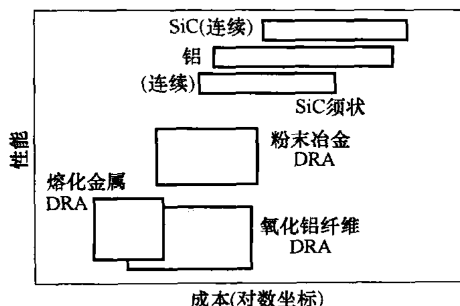


图3.14-33　不同铝基复合材料的材料成本与其性能的关系，DRA，断续增强铝

铝MMC的代号体系

由于铝MMC的生产远多于所有其他基体合金所组合的MMC，铝业协会(Aluminum Association或AA)为MMC制订了一套标准代号体系，现已为美国国家标准协会所采用。ANSI 35.5-1992规定了铝MMC识别如下：

基体/增强剂/其体积百分比+形态　　(3.14-5)

例如，2124/SiC/25w表示在AA登记的体积25%的须状碳化硅增强的合金2124，7075/Al_2O_3/10p表示在AA登记的体积10%的微粒状氧化铝增强的合金7075，6061/SiC/47f表示在AA登记的体积47%的连续碳化硅纤维增强的合金6061以及A356/C/05C是一种在AA登记的体积5%的切断石墨纤维增强的铸造合金。

断续铝MMC

在断续增强铝复合材料中，最常用的增强剂材料是SiC和Al_2O_3，尽管在一些专门的用途里也使用氮化硅(Si_3N_4)、TiB_2和石墨。例如，铝-石墨合金由于其优异的减摩、抗磨和抗咬死的特征，而被开发用于摩擦学的用途。表3.14-34列出用于增强铝合金的材料性能。

表3.14-34　微粒状(p)、须状(w)和切断纤维(c)的一般性能

性　能	增　强　剂						
	SiC_p	Al_2O_{3p}	TiB_{2p}	Si_3N_{4p}	Al_2O_{3c} ①	SiC_w ②	Si_3N_{4w}
密度/(g/cm³)	3.21	3.97	4.5	3.18	3.3	3.19	3.18
直径/μm	—	—	—	—	3~4	0.1~1.0	—
热膨胀系数/(10^{-6}/K)	4.3~5.6	7.2~8.6	8.1	3.0	~9	4.8	3.8
抗拉强度/MPa(ksi)	100~800③ (14.5~116)③	70~1000③ (10~145)③	700~100③ (101.5~145)③	250~100③ (36~145)③	>2000 (>290)	3000~14000 (435~2030)	13800 (2001)
弹性模量/GPa(10^6psi)	200~480 (29~70)	380(55)	514~574 (75~83)	304(44)	300(43.5)	400~700 (58~101.5)	379(55)
伸长率(%)	—	—	—	—	0.67	1.23	

①Saffil(96% Al_2O_3-4% SiO_2)。　②>98% SiC。　③整体上的横向断裂强度。

断续铝MMC的工艺方法包括不同的铸造工艺：液态金属的浸渗、喷涂沉积和粉末冶金。在后面将分别简单介绍这些工艺。

增强剂对性能的影响。MMC的力学性能除了基体材料的力学性能之外，还取决于分散相(增强剂)的数量、大小、形状和分布，以及界面的性质。按照定义，一种复合材料一般要求一定大小(>1μm)的分散相数量(体积分数>1%)，不像在分散强化材料里，只是起控制位错移动的作用而是要用以承受载荷。分散相的形状对于决定其承载能力是如此的重要，以致复合材料要据此进行分类：①有连续和断续纤维的纤维增强复合材料；②微粒状或须状增强的复合材料。其形状是用长宽比表征的。在连续纤维复合材料中载荷直接作用于基体和纤维上。在断续纤维复合材料或微粒增强复合材料中，载荷是通过基体传递到分散体上。

利用数学模型可以预测MMC的性能，这需要输入有关其组分性能和几何的参数。这些数学表达式包含有一些混合模型的简单规律，可以通过本节结尾的精选参考资料查阅它们。然而一般来说，硬微粒增强剂(如SiC)对断续铝MMC有关力学和物理性能的影响归纳如下：

- 抗拉强度和屈服强度均随增强剂含量比例的增加而提高(应当指出的是这些性能随软颗粒如石墨的增加而降低)。
- 断裂韧度和塑性(伸长率和至失效时的应变)随增强剂体积比例的增加而降低。
- 弹性模量随增强剂体积比例的增加而提高;
- 热导率和电导率及热膨胀系数都随增强剂体积比例的增加而降低。

图3.14-34示出了SiC的体积比例对断续铝MMC性能的影响。

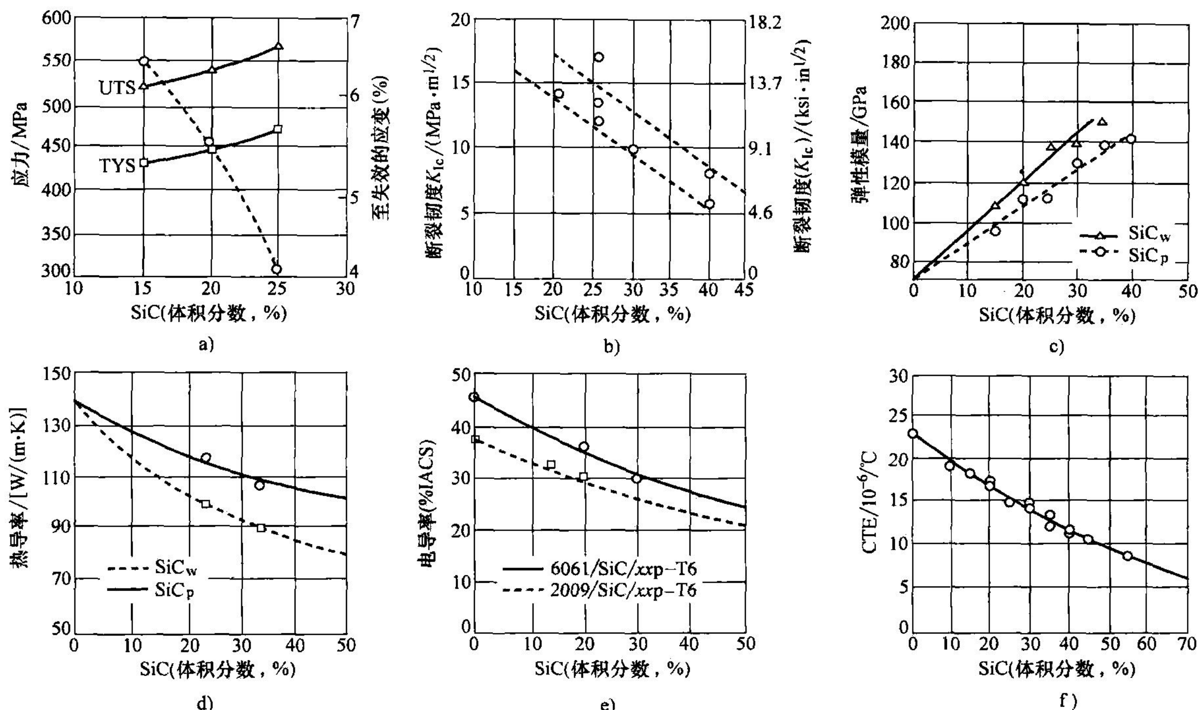


图3.14-34 增强剂的体积比对铝金属基体复合材料(MMC)性能的影响

a) 6013/SiC/xxp-T6的抗拉强度(UTS),拉伸屈服强度(TYS)和至失效的应变(ε_f) b) 断裂韧度作为SiC的体积比例的函数 c) 弹性模量作为SiC_w和SiC_p的体积比例的函数 d) 2009/SiC/xx-T6的热导率 e) 2009/SiC/xx-T6和6061/SiC/xxp-T6的电导率 f) 6061/SiC/xxp-T6的热膨胀系数(CTE)

铸造铝MMC。在搅拌浇铸(或混合/涡旋)过程中,将经预处理和预制的增强剂填充相倒入连续搅拌的熔化基体里,然后浇铸进入砂型、金属型或压力模铸型。在惰性气体并混有Ar-SF_6混合气体的遮蔽下熔化,并以此进行助熔和脱气,这些对于防止气体的吸入是必不可少的。还可以利用超声波作用或者借助于往返搅棒、离心或失重工艺促其混合。

基体合金包括专用于MMC工艺的铝-硅复合制品(表3.14-35)。增强剂包括10~20μm大小的SiC或Al_2O_3微粒,其体积含量从10%~30%。图3.14-35所示是其一种典型的显微组织。表3.14-36列出的是采用高压型铸造铝MMC所得到的典型力学性能。铸铝MMC的发展促进了汽车工业。其目前和潜在的应用包括制动转盘和制动鼓、制动钳、刹车片钢背以及缸套。

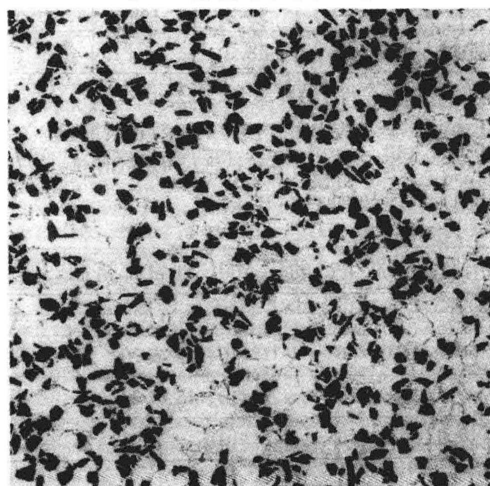


图3.14-35 含20%(体积分数)SiC的铝基复合材料的典型显微组织。125×

表3.14-35　用断续增强的铝金属基体复合材料的基体合金

合金	化学成分(质量分数,%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Ti	Zn	其他	Al
高压压力铸造										
F3D①	9.50~10.5	0.80~1.20	3.00~3.50	0.50~0.80	0.30~0.50	1.00~1.50	0.20 最大	0.03 最大	0.03 最大,	余量
F3N②	9.50~10.5	0.80~1.20	0.50~0.80	0.20 最大	0.50~0.70	—	0.20 最大	0.03 最大	0.03 最大, 0.10 总量	余量
砂型和金属型铸造										
F3S③	8.50~9.50	0.20 最大	0.20 最大	—	0.45~0.65	—	0.20 最大	—	0.03 最大, 0.10 总量	余量
F3K④	9.50~10.5	0.30 最大	2.80~3.20	—	0.80~1.20	1.00~1.50	0.20 最大	—	0.03 最大, 0.10 总量	余量

①Duralcan F3D*xx*S 复合材料(*xx* = SiC 微粒的体积百分比)是一般应用、压铸的复合材料。它们类似于 380/SiC/xxp(铝业协会 MMC 名称)。　②Duralcan F3NxxS 复合材料，实际上不含铜或镍，专用于对腐蚀敏感的用途。它们类似于 360/SiC/xxp。③Duralcan F3SxxS 复合材料(xx = SiC 微粒的体积百分比)是用于一般室温用途的复合材料。它们类似于 359/SiC/xxp(铝业协会 MMC 名称)。　④Duralcan F3KxxS 复合材料，含相当量的铜和镍，专用于高温用途。它们类似于 339/SiC/xxp。

引自：美国 Duralcan 公司。

表3.14-36　高压压力铸造的 F3D/SiC 复合材料的典型力学性能

材　料	抗拉强度		屈服强度		伸长率①(%)	弹性模量		硬度 HRB	冲击吸收功	
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi		J	lbf·ft
A380-F②	317	46.0	159	23.1	3.5	71.0	10.3	40	3.4	2.5
A390-F②	283	41.0	241	34.9	1.0	81.4	11.8	76	1.4	1.0
F3D.10S-F③	345	50.0	241	34.9	1.2	93.8	13.6	77	1.4	1.0
F3D.10S-O④	276	40.0	152	22.0	1.7	93.8	13.6	55	2.7	2.0
F3D.10S-T5④	372	53.9	331	48.0	0.7	93.8	13.6	84	1.4	1.0
F3D.20S-F③	352	51.0	303	43.9	0.4	113.8	16.5	82	0.7	0.5
F3D.20S-O④	303	43.9	186	27.0	0.8	113.8	16.5	62	1.4	1.0
F3D.20S-T5⑤	400	58.0	⑥	⑥	⑥	113.8	16.5	87	0.7	0.5

注：基体合金的成分见表3.14-35。

①通过从应力-应变图直接得到读数进行测量。　②手册值。　③铸造到尺寸的拉伸棒。　④铸造到尺寸的拉伸棒，343℃(649℉)退火4h。　⑤铸造到尺寸的拉伸棒，177℃(351℉)时效5h。　⑥试棒在屈服之前发生断裂。

引自：美国 Duralcan 公司。

用搅拌铸造生产的铝 MMC 通常都挤制的，目前以挤制坯料供应的锻压复合材料包括：

复 合 材 料	Al_2O_3含量(体积分数,%)	复 合 材 料	Al_2O_3含量(体积分数,%)
6061/Al_2O_3/xp	10、15 或 20	7005/Al_2O_3/xp	10
2014/Al_2O_3/xp	10、15 或 20	7075/Al_2O_3/xp	10
1060/Al_2O_3/xp	10		

表3.14-37 列出了挤制搅拌铸铝 MMC 的室温下性能。

表 3.14-37 在 T6 条件下的挤制搅拌铸铝 MMC 的室温性能

材料	Al_2O_3 含量(体积分数,%)	抗拉强度				屈服强度				伸长率(%)	弹性模量		断裂韧度	
		典型		最小①		典型		最小						
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6 psi	$MPa \cdot m^{1/2}$	$ksi \cdot in^{1/2}$
$6061/Al_2O_3/xp$	0	310	45	260	38	275	40	240	35	20	69.0	10.0	29.6	27.0
	10	350	51	325	47	295	43	260	38	10	81.4	11.8	24.0	21.9
	15	365	53	340	49	325	47	290	42	6	89.0	12.9	22.0	20.0
	20	370	54	345	50	350	51	315	46	4	97.2	14.1	21.5	19.6
$2014/Al_2O_3/xp$	0	525	76	470	68	475	69	415	60	13	73.1	10.6	25.3	23.0
	10	530	77	495	72	495	72	455	66	3	84.1	12.2	18.0	16.4
	15	530	77	495	72	505	73	460	67	2	93.8	13.6	18.8	17.1
	20	515	75	485	70	505	73	460	67	1	101	14.7	—	—

注：数据由挤压的棒或圆棒(挤压比为 ~20 至 1)。

①数值代表 99% 置信区间。

挤压铸造铝 MMC。挤压铸造是一种熔化金属在作用于密闭的模具的压力下固化的铸造工艺，其模具置于液压机的平板之间。熔化金属的作用压力及其与模具表面的瞬间接触会产生一种热量快速传递的条件，以此产生无疏松、细晶粒的铸件，而且其力学性能接近锻压产品的性能。

铝 MMC 的挤压铸造就是先将一个疏松陶瓷预成形件置于经预热的模具之内，随后让液态金属注入，并施以压力。这时液态金属借助压力浸渗入疏松的陶瓷预制件内，以此形成一种致密的金属陶瓷复合材料。

挤压铸造之所以特别受人重视是因为这种工艺将所用的材料和能量降低到最低限度，生产出净形状的零件，而且具有一种可供选择增强剂的能力。现已生产断续和连续的两种增强剂，含量高达(体积分数)45%的铝-铜、铝-硅和铝-锰增强合金。

流变铸造铝 MMC。流变铸造也称之为复合铸造，它类似于金属搅拌方法，但与将微粒搅拌人完全的液态金属不一样，它是在半固体的(触变性的)状态下进行搅拌的，随后在压力下进行浇铸。SiC、Al_2O_3、TiC、Si_3N_4、石墨、云母、玻璃、矿渣、氧化镁和碳化硼的微粒和断续纤维都能借助这种技术被加入到强烈搅拌并部分固化的铝合金熔浆中。

液态金属的浸渗。Primex 无压金属浸渗工艺所采用的材料和工艺控制能使金属有效而又不发生反应地渗透进入增强剂中，在浸渗构成中无需施加压力或使用真空。增强的程度受控于被浸渗材料的初始密度。只要存在相互连接的孔隙和适当的浸渗条件，液态金属就能自动渗透进入预成形件中。

用于制造增强铝复合材料的关键工艺原料包括铝合金、氮气氛和存在于系统中的镁。在加热到浸渗温度(~750℃或 1380℉)的过程中，镁与氮气氛发生反应生成氮化镁(Mg_3N_2)。Mg_3N_2 是一种浸渗增强剂，它促使铝合金浸渗人增强相而无需施加压力或使用真空。在浸渗过程中，Mg_3N_2 被铝还原生成少量的氮化铝(AlN)。可以看到 AlN 是一种少量的析出物，并作为薄膜存在于增强相的表面。镁就是通过这种反应进入合金。

无压浸渗工艺通过合金化学的调整、微粒的种类、形状、大小和添加量而生产出一大批不同的工程复合材料。在铸造复合材料中，微粒的添加量可以高达(体积分数)75%，还得有微粒形状和大小正确结合。图 3.14-36 所示是一种典型的显微组织。

在液态金属浸渗铸造的复合材料中，应用最为广泛的是用(体积分数)30% SiC 增强的 Al-10Si-1Mg 合金。存在于这种合金中的 1% Mg 是在浸渗过程中通过 Mg_3N_2 的还原获得。这种复合材料系统适用于除金属型铸造外的所有铸造工艺。使用金属型最多的复合材料是按照这种复合材料系统再加入 1% Fe。合金的改性可以在浸渗以前对其进行，或浇铸前在坩埚里进行。对于这种复合材料系统，仅仅能普遍适用的合金限制就是镁的存在并形成 Mg_3N_2。对于含有 SiC 的系统，还必须有足够量的硅存在，才能遏制碳化铝(Al_4C_3)的形成。还生产一种由 Al_2O_3-增强铝构成的复合材料，它具有过低的磨损率。

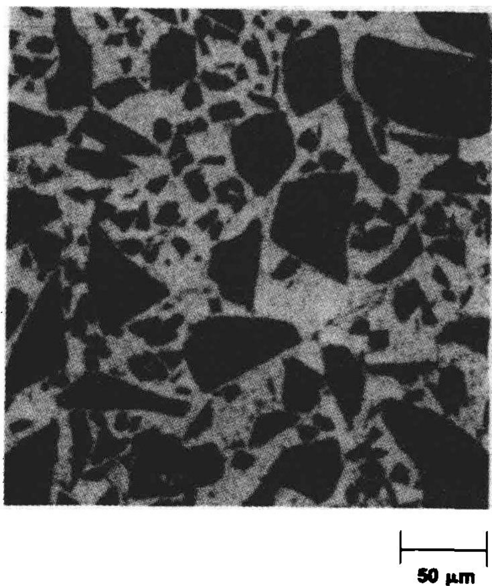


图 3.14-36 通过液态金属的浸渗工艺生产的断续Al/SiC MMC(体积分数 60%SiC)

无压熔化金属浸渗的一个重要应用领域就是电子元件的 Al/SiC_p封装，基片以及支承结构。其典型要求包括低热膨胀系数(CTE)，以此在安装和工作的过程中减小作用于电子器件上的机械应力；高热导率，以便于热量的散发、高刚性使变形减至最小；以及低密度，以使重量减至最小。与传统的铝合金相比，高添加量 SiC 微粒的复合材料所具有的特点是大大减小的 CTE，明显较高的弹性模量，以及几乎不受任何影响的热导率或密度(表 3.14-38)。

表 3.14-38 用于电子用途的 Al/SiC/*xx*pMMC 的物理性质

性质	复合材料，SiC 添加量		典型的铝合金
	55(体积分数,%)	70(体积分数,%)	
热膨胀系数/[10^{-6}/℃ (10^{-6}/℉)]	8.5(4.7)	6.2(3.4)	22~24 (12~13)
热导率/{W/(m·K) [Btu/(h·ft·℉)]}	160(93)	170(99)	150~180 (87~104)
密度/[g/cm^3(lb/in^3)]	2.95 (0.106)	3.0 (0.0108)	2.7 (0.097)
弹性模量/GPa(10^6 psi)	200(29)	270(39)	70(10)

喷涂沉积。它包括使液体金属雾化但不能像生产金属粉末那样让液滴全都固化，再使半固态的液滴积聚在基片上。这种工艺是一种混合式的快速凝固过程，因为金属要经历一个从液相到固相的快速转化，再从固相缓慢地冷却到室温。由此最后形成一种溶质溶解度没有显著增高的细化晶粒和析出的组织。

喷涂沉积生产的 MMC 锭块能在标准喷涂沉积的金属喷涂中导入微粒，以此促成其与雾化金属在基片上面的共沉积。通过对雾化和微粒送料条件的精心控制确保微粒在一般 95%~98% 密度范围内的铝基体中形成均匀分布。

许多含有 SiC 微粒的铝合金都是利用喷涂沉积生产的。它们包括铝-硅铸造合金和 2*xxx*、6*xxx*、7*xxx* 和 8*xxx*(铝-锂)系列的锻压合金。以 SiC 增强的 8090 合金，其比模量(材料的弹性模量与其密度之比——译者注)获得显著提高(表 3.14-39)。用喷涂沉积生产的产品包括实心和空心的挤压件、锻件、薄板以及重熔压力铸造的铸件。

表 3.14-39 传统工艺制造的铝合金(锭块冶金)和喷涂沉积铝 MMC 的性质

材料	弹性模量		密度		比模量	提高率(%)
	GPa	10^6 psi	g/cm^3	lb/in^3		
2014	72	10	2.8	0.101	25.7	0
8090	80	12	2.55	0.092	31.4	22
2014/SiC/15p①	95	14	2.84	0.103	33.5	30
8090/SiC/15p①	100	15	2.62	0.095	38.2	49

①喷涂共沉积、挤压和峰时效。

P/M 铝 MMC。铝 MMC 的粉末冶金工艺分为微粒状和须状的 SiC，尽管 Al_2O_3的颗粒与 Si_3N_4的晶须也能使用。其工艺过程包括：①将气体-雾化基体合金与粉末状的增强剂相混合；②将均质混合物压制成大约 80% 密度的坯块(冷压)；③使预成形件(具有相互连通孔隙的组织)脱气，排除挥发性的杂质(润滑剂、混合剂及混合添加剂)、水蒸气和气体；④利用真空热压或热等静压方法进行压结。然后该热压的柱形坯料可以进行挤压、轧制或锻造。晶须增强的铝 MMC 可以在挤压或轧制的过程中使晶须在一定程度上排序(见图 3.14-37)。控制晶须的排序能使生产的铝 MMC 产品性能具有方向性，这对于一些高性能的用途是很需要的。薄板的横向轧制能产生一种较为平面化的晶须排序，从而形成二维上的各向同性。

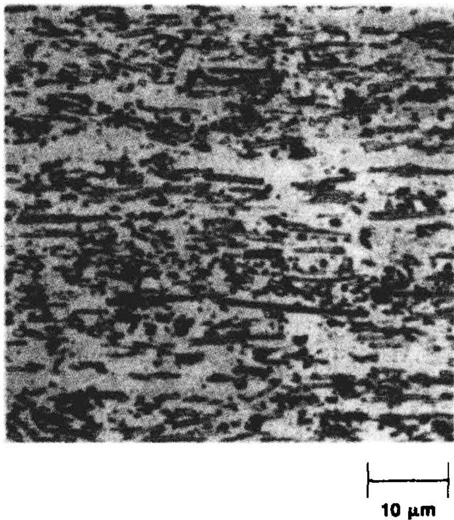


图3.14-37 晶须按轧制方向而排列的SiC晶须增强(体积分数20% SiC)铝合金薄板

晶须增强的铝MMC的力学性能优于任何一种常用体积比例(见图3.14-38)的颗粒增强复合材料。表3.14-40和表3.14-41所列的是晶须排序对于铝MMC性能的影响。表3.14-42列出的是颗粒增强铝合金的典型力学性能。

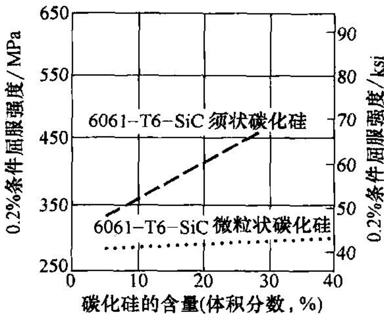


图3.14-38 须状和微粒状增强剂的铝MMC的屈服强度比较

表3.14-40 密度为2.86g/cm³的MMC坯块和挤压板材的典型性能，以此表明SiC晶须排序的影响

MMC材料形式	试件方位	抗拉强度		屈服强度①		热膨胀系数(α)		MMC材料形式	试件方位	抗拉强度		屈服强度①		热膨胀系数(α)	
		MPa	ksi	MPa	ksi	10^{-6}/K	10^{-6}/℉			MPa	ksi	MPa	ksi	10^{-6}/K	10^{-6}/℉
圆柱形坯块，直径 305mm (12in)	纵向(轴向)	496	71.9	351	50.9	16.1	8.95	挤压件，13×125mm(½×5in)	纵向	737	107	448	64.9	13.0	7.23
	横向	503	72.9	358	51.9	16.4	9.12		横向(长)	462	67.0	379	54.9	19.6	10.9

注：材料：用20%(体积分数)的SiC晶须增强的2024-T6。

①0.2%条件屈服强度。

表3.14-41 用晶须SiC增强的铝合金薄板的典型性能

薄板厚度		试件方位	抗拉强度		屈服强度①		伸长率(e),%	弹性模量		断裂韧度 K_c	
mm	in		MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
2.54	0.10	纵向(沿轧制方向)	718	104	573	83.1	5.3	114	16.5	55	50
2.54	0.10	横向(与轧制方向成90°)	559	81.0	386	56.4	8.5	95	14	59	54

注：材料：用20%(体积分数)的SiC晶须增强的2024-T6。

①0.2%条件屈服强度。

表3.14-42 用SiC微粒增强的铝合金复合材料的典型力学性能

合金(体积分数,%)	弹性模量		屈服强度		抗拉强度		塑性(%)	合金(体积分数,%)	弹性模量		屈服强度		抗拉强度		塑性(%)
	GPa	106 psi	MPa	ksi	MPa	ksi			GPa	106 psi	MPa	ksi	MPa	ksi	
6061								6061							
锻压	68.9	10	275.8	40	310.3	45	12	锻压	68.9	10	275.8	40	310.3	45	12
15	96.5	14	400.0	58	455.1	66	7.5	20	103.4	15	413.7	60	496.4	72	5.5

（续）

合金（体积分数,%）	弹性模量		屈服强度		抗拉强度		塑性（%）
	GPa	106 psi	MPa	ksi	MPa	ksi	
6061							
锻压	68.9	10	275.8	40	310.3	45	12
25	113.8	16.5	427.5	62	517.1	75	4.5
30	120.7	17.5	434.3	63	551.6	80	3.0
35	134.5	19.5	455.1	66	551.6	80	2.7
40	144.8	21	448.2	65	586.1	85	2.0
2124							
锻压	71.0	10.3	420.6	61	455.1	66	9
20	103.4	15	400.0	58	551.6	80	7.0
25	113.8	16.5	413.7	60	565.4	82	5.6
30	120.7	17.5	441.3	64	593.0	86	4.5
40	151.7	22	517.1	75	689.5	100	1.1
7090							
锻压	72.4	10.5	586.1	85	634.3	92	8
20	103.4	15	655.0	95	724.0	105	2.5
25	115.1	16.7	675.7	98	792.9	115	2.0
30	127.6	18.5	703.3	102	772.2	112	1.2
35	131.0	19	710.2	103	724.0	105	0.90
40	144.8	21	689.5	100	710.2	103	0.90
7091							
锻压	72.4	10.5	537.8	78	586.1	85	10
15	96.5	14	579.2	84	689.5	100	5.0
20	103.4	15	620.6	90	724.0	105	4.5
25	113.8	16.5	620.6	90	724.0	105	3.0
30	127.6	18.5	675.7	98	765.3	111	2.0
40	139.3	20.2	620.6	90	655.0	95	1.2

连续纤维铝MMC

如图3.14-33所示，以连续纤维为增强剂的铝MMC具有最佳功能/强度。然而由于其高成本，大部分应用仅限于航天工业。

铝/硼。这是一种技术上已成熟的连续纤维MMC（见图3.14-39）。适合这种复合材料的应用包括用于航天飞行器的中段机身管形桁架结构和作为电子微芯片载体的多层线路板的冷却板。铝/硼复合材料的制造工艺的原理是在铝箔层与硼纤维夹层之间（箔-纤维-箔处理）交错地热压扩散粘结，或者等离子喷涂法。表3.14-43列出了铝/硼复合材料经选择的一些性能。

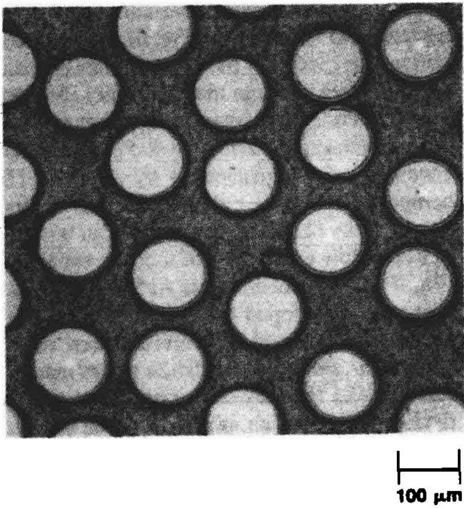


图3.14-39　连续纤维增强铝/硼复合材料的横截面。在6061铝合金基体中，直径为142μm并有B_4C涂层的硼丝

表3.14-43　单向连续纤维的铝基体复合材料在室温下的性能

性　能	B/6061Al	SC8-2/6061Al①	P100Gr/6061Al	FP/Al-2Li②
纤维含量（体积分数，%）	48	47	43.5	55
纵向模量/GPa(10^6psi)	214(31)	204(29.6)	301(43.6)	207(30)
横向模量/GPa(10^6psi)	—	118(17.1)	48(7.0)	144(20.9)
纵向强度/MPa(ksi)	1520(220)	1462(212)	543(79)	552(80)
横向强度/MPa(ksi)	—	86(12.5)	13(2)	172(25)

①SCS-2是一种碳化硅纤维。　②FP是一种α氧化铝（$\alpha-Al_2O_3$）纤维。

连续SiC纤维。它们常替代硼纤维的应用，因为

两者有相似的性能(例如拉伸模量为400GPa或60×10^6psi)和成本上的优势。有一种SiC纤维为SCS，它有多种的表面化学方法可供选用制造，即以如铝或钛的微粒基体增强其粘结性。经处置，适用于铝的SCS-2纤维有1μm(0.04mil)厚度的富碳涂层，用以向外表面提高其含硅量。

热模压是一种低压、热压的成型工艺，专用于制造Al/SiC零件，其成本有可能比扩散粘结/固态工艺低不少。因为SCS-2纤维能长期承受熔化铝，故模压温度可以提高到液态加固态的范围内，以此保证铝在低压下流动和凝固，从而不再需要配备高压的模具压制设备。

热模压工艺类似于石墨-环氧树脂的热压釜成型工艺，后者零件是在一种有敞开面的模具里压制的。这时模型是一种自加热的、粉浆浇铸的陶瓷模具，它具有成品零件的轮廓。将等离子喷涂铝的预成形件放入模型，加热至接近铝的熔化温度，利用一个金属真空包在高压釜内加压固结。

与未经增强的铝相比，铝/SiC MMC表现出较高的强度和刚度，而无需增加重量。6061/SCS-2复合材料的拉伸性能如表3.14-43所示。对照其基础金属，复合材料能将其室温的抗拉强度保持到高达260℃(500℉)的温度里。

铝/石墨MMC。20世纪60年代一开始，促使其开发只是由于碳纤维有坚硬的商业表象。碳纤维具有的各种性能包括高达966GPa(140psi×10^6)的弹性模量和低至-1.62×10^{-6}/℃(-0.9×10^{-6}/℉)的负CTE值(热膨胀系数)。然而，碳和铝的混合很难加工结合成为一种复合材料。碳和铝之间的难以发生反应、碳的难以为液态铝所湿润以及碳的易氧化性，都成为生产这类复合材料的主要技术障碍。目前生产工业用铝MMC有两种工艺：作为基体的液态金属在纤维絮分布中的浸渗和将纤维絮夹布在铝箔之间进行热压粘结。借助先驱丝和金属涂层的纤维两种材料，需要采用如扩散粘结或拉挤的二次工艺制造其结构元件。为制造这种复合材料还可以采用挤压铸造。

鉴于尺寸稳定性而要求高精度的精密航天结构件需要用刚性高、重量轻以及低热变形的材料。铝/石墨MMC具有满足上述要求的潜在能力。单一方向的P100Gr/6061铝拉挤管在沿纤维的方向上展现比钢更好的弹性模量，而它的密度只约有钢的1/3。其性能如表3.14-43所列。

铝/Al_2O_3 MMC。这种材料可以用多种方法制造，但是一般都采用液态或半固态的工艺技术。包括纤维FP(99.5% Al_2O_3)和Saffil(96 Al_2O_3-4SiO_2)的氧化铝纤维都是价格低廉，并且其性能与未经增强的铝合金比较均得以改进的复合材料。例如耐磨性和耐热疲劳变形性提高而热膨胀系数降低的复合材料。连续纤维Al/Al_2O_3 MMC就是将Al_2O_3带状纤维按所要求的方向制成预成形件，再将其插入模型，在里面借助真空用熔化铝进行浸渗。通过在液态金属中加入少量的锂而实现增强剂在基体上的粘结。表3.14-43所列是单向Al-2Li/Al_2O_3的室温下性能。

钛基体复合材料

钛之所以被选用于基体材料，是因为其在室温和适度的高温中具有良好的特定强度及其优异的耐腐蚀性。由于钛比铝更能在较高的温度中保持其强度，所以它已越来越多地代替铝被应用于当飞行速度从亚音速增至超音速时的一些飞机和导弹结构件。

连续纤维钛MMC。选择碳化硅纤维作为钛MMC的增强剂。SCS-6纤维是一种直径为142微米的碳芯单丝。还开发了一种有碳涂层的、直径为127μm的钨芯单纤维。直径为102μm的并有碳和二硼化钛涂层的钨芯单丝也有应用。(体积分数)30%~40%的纤维含量是很普通的(见图3.14-40)。传统的基体合金包括用于低温用途的Ti-6Al-4V和当要求有较高的抗蠕变性及温度高于Ti-6Al-4V所用的最高温度时，就应使用Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo(Ti-6242)。Ti-6242合金用于涡轮发动机的内置式排气旁通阀活塞和加强型风扇框架。最近，氧化铝的有序金属间化合物，如Ti-22Al-23Nb和Ti-22Al-26Nb已经作为基体材料使用。这些材料正在开发用于旋转叶片和螺旋桨。航天

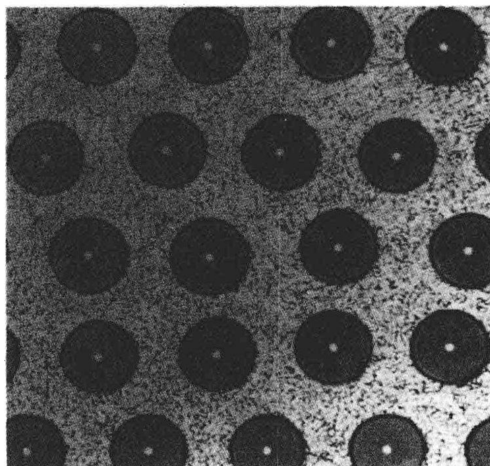


图3.14-40 在SiC增强的钛MMC的典型纤维排列。实际纤维的直径为127μm。由大西洋研究所的查尔斯·R·罗伊友好提供

上使用的钛 MMC 所采用的工艺技术包括纤维-箔-纤维工艺以及结合热等静压所用的铸造带材或卷绕线材。钛基体也可使用等离子喷涂技术沉积在纤维上。类似地，利用电子束的物理气相沉积技术将金属镀在纤维上也已证明是可行的。

表 3.14-44 列出了有代表性的单向 SiC/Ti 叠层所表现的性能。

表 3.14-44 一种单向 SiC_c/Ti MMC 的室温下性能

性 能	SCS-6/Ti-6Al-4V
纤维含量(体积分数,%)	37
纵向弹性模量/GPa(10^6psi)	221(32)
横向弹性模量/GPa(10^6psi)	165(24)
纵向强度/MPa(psi)	1447(210)
横向强度/MPa(psi)	413(60)

颗粒增强钛 MMC。它是用 P/M 制成的。研究过不同的材料，最为普通的结合还是用(体积分数) 10%~20% TiC 增强的 Ti-6Al-4V。这些复合材料具有不断提高的硬度和超过传统钛合金的耐磨性。表 3.14-45 列出了未经增强和经增强的 Ti-6Al-4V 的性能比较。

表 3.14-45 用 TiC 颗粒增强的钛 MMC 的性能

性 能	Ti-6Al-4V	10%(质量分数) TiC/Ti-6Al-4V	20%(质量分数) TiC/Ti-6Al-4V
密度/[g/cm³(lb/in³)]	4.43 (0.160)	4.45(0.16)	4.52 (0.162)
抗拉强度/MPa(ksi)			
室温	896(130)	999(145)	1055(153)
540℃(1000℉)	448(65)	551(80)	620(90)
弹性模量/GPa(10^6psi)			
室温	113(16.5)	133(19.3)	144(21)
540℃(1000℉)	89(13)	105(15.3)	110(16)
疲劳极限(10^6周)/MPa(ksi)	517(75)	275(40)	—
断裂韧度/[MPa·$m^{1/2}$(ksi·$in^{1/2}$)]	55(50)	44(40)	32(29)
线热膨胀系数，室温至 540℃ 或 1000℉ /ppm/℃	8.5	8.1	8.0
硬度 HRC	34	40	44

其他重要的 MMC

镁基体复合材料。这种复合材料具有基本上与铝 MMC 相同的性能：高刚性、轻重量和低热膨胀系数。事实上，作为基体通常是依据其重量与耐腐蚀性在铝和镁之间进行选择。镁的密度大约为铝的 2/3，但是它在腐蚀性环境中更为活泼。镁还有较低的热导率，有时这也是它的一个选择的因素。镁 MMC 包括用于航天结构件的连续纤维 Gr/Mg、用于汽车发动机零件的短 U 形纤维 Al_2O_3/Mg，以及用于发动机零件和低膨胀电子包装材料的断续 SiC 或 B_4C/Mg。基体合金包括 AZ31、AZ91、ZE41、QE22 和 EZ33。所用工艺方法类似于与之相应的铝 MMC。

铜基复合材料。这种材料是用连续的钨、碳化硅和石墨的纤维增强剂而生产的。其中连续石墨/铜 MMC 被研究得最多。

先进石墨纤维的开发成功引起对连续石墨/铜 MMC 的兴趣。铜具有良好的导热性，但它比较重，且其高温力学性能也较差。在室温下的轴向热导率性能较铜好的沥青基石墨纤维现已得到开发。这种纤维除了相对于铜能减小密度、增加刚度、提高使用温度以外，还具有量身定制热膨胀系数的机制。制造石墨/铜 MMC 的一种方法就是利用电镀工艺即用纯铜镀层包敷每一根石墨纤维，并使 MMC 纤维有足够的柔性用以编成织物。镀铜纤维必须通过热压才能生产出固化零件，表 3.14-46 将铝、铜 MMC 与未经增强的铝、铜的热学性能进行了比较。石墨/铜 MMC 具有在电子器件和人造卫星的辐射面板以及先进的飞机结构件上用于热控制的潜在能力。

表 3.14-46 未经增强和经过增强的铝和铜的热性能

材 料	增强剂含量(体积分数,%)	密 度		轴向导热性		轴向膨胀系数	
		g/cm³	lb/ft³	W/(m·℉)	Btu/(ft·h·℉)	10^{-6}/℃	10^{-6}/℉
铝	0	2.71	169	221	128	23.6	13.1
铜	0	8.94	558	391	226	17.6	9.7
SiC_p/Al	40	2.91	182	128	74	12.6	7
P120Gr/Al	60	2.41	150	419	242	-0.32	-0.17
P120Gr/Cu	60	4.90	306	522	302	-0.07	-0.04

超合金基体的复合材料。将耐熔金属(钨、钼和铌)线材作为纤维增强剂用于高温超合金 MMC 还是

受到很大的重视，尽管其耐氧化性差和密度高。虽然耐熔合金的纤维增强复合材料的理论比强度潜力小于陶瓷纤维增强复合材料，但是塑性较大的金属纤维系统允许有较大的纤维-基体反应和热膨胀失调性。若将耐熔金属纤维用于给一种塑性和耐氧化的基体增强，它们就能受到不被氧化的保护，而且在高温下其复合材料的比强度也大大高于超合金。

超合金 MMC 的制造是通过固相、液相或沉积的工艺而完成的。其方法包括熔模铸造、使用很薄的薄板形式的基体金属、使用由粉末和有机粘合剂轧制成粉末薄板形式的基体金属、粉末冶金技术、金属合金粉末的粉浆浇铸，以及电弧喷涂。

图 3.14-41 比较了用不同耐熔金属丝增强的镍基超合金(Waspaloy)。如图所示，含(体积分数)50% W-24Re-HfC 的复合材料在 1093℃(2000℉)具有最高的强度。

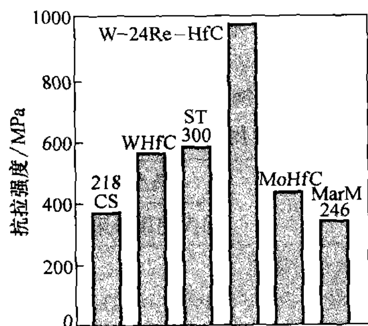


图3.14-41 用50%(体积分数)耐熔金属丝增强的 Waspaloy 镍基合金的高温(1093℃或2000℉)抗拉强度。 218CS 代表掺杂钾的钨，ST300 是 W-1.0ThO$_2$ 合金。比较数据还包括未经增强的镍基超合金 MarM246

金属间化合物基体的复合材料。 超合金 MMC 的一个缺点就是其高密度，因此限制了用这种材料所制造的零件的潜在最小重量。金属间化合物基体复合材料(IMC)的高熔点和相对较低的密度，使其成为较轻的涡轮发动机材料的重要选材。镍、钛和铁的铝化物作为 IMC 的基体材料而受到关注。在本章第 12 节将介绍用 TiB$_2$增强的铝化钛的性能数据。

精选参考文献

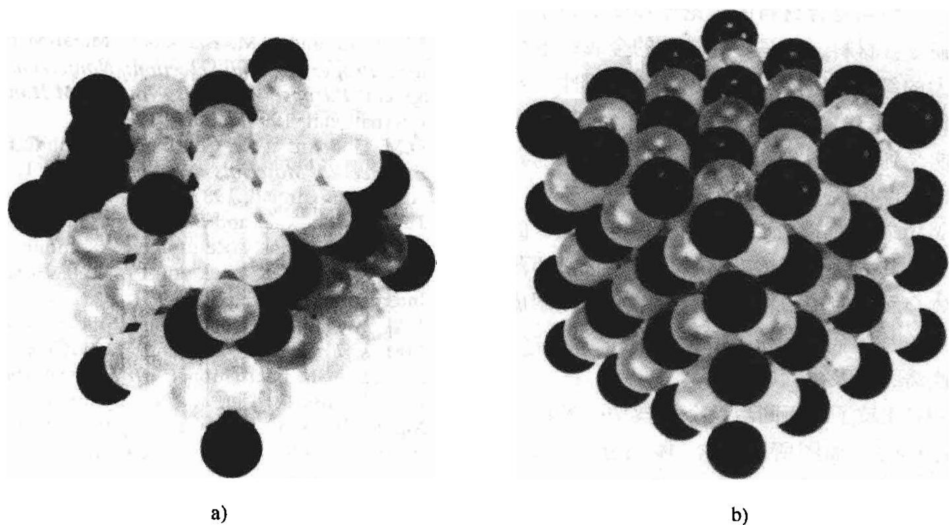
- Aluminum-Matrix Composites, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1993, p 160–179.
- D.M. Aylor, Corrosion of Metal-Matrix Composites, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 859–863.
- M.E. Buck and R.J. Suplinskas, Continuous Boron Fiber MMCs, *Engineered Materials Handbook*, Vol 1, *Composites*, ASM International, 1987, p 851–857.
- J.L. Cook and W.R. Mohn, Whisker-Reinforced MMCs, *Engineered Materials Handbook*, Vol 1, *Composites*, ASM International, 1987, p 896–902.
- J.V. Foltz and C.M. Blackman, Metal-Matrix Composites, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 903–912.
- D.M. Goddard et al., Continuous Graphite Fiber MMCs, *Engineered Materials Handbook*, Vol 1, *Composites*, ASM International, 1987, p 867–873.
- J.J. Lewankowski and P.M. Singh, Fracture and Fatigue of Discontinuously Reinforced Aluminum Composites, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, *ASM Handbook*, ASM International, 1996, p 895–904.
- J.A. McElman, Continuous Silicon Carbide Fiber MMCs, *Engineered Materials Handbook*, Vol 1, *Composites*, ASM International, 1987, p 858–866.
- P.K. Rohatgi, Y. Liu, and S. Ray, Friction and Wear of Metal-Matrix Composites, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol 18, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, p 801–811.
- J.C. Romine, Continuous Aluminum Oxide Fiber MMCs, *Engineered Materials Handbook*, Vol 1, *Composites*, ASM International, 1987, p 874–877.

第 12 节 结构用金属间化合物

有序金属间化合物的合金是在临界温度以下形成长程有序的晶体组织(见图 3.14-42)的一类独特金属材料，该温度一般也称为临界有序温度(T_c)。这种有序的金属间化合物通常以一种近似简单的化学计量比存在于相对窄的成分范围里(见本节所示的相图)。

在探索新的高温结构材料过程中，引发了对于有序金属间化合物的关注。近来更多的兴趣集中于基于 Ni_3Al 和 NiAl 的铝化镍、基于 Fe_3Al 和 FeAl 的铝化铁以及基于 Ti_3Al 和 TiAl 的铝化钛上。这些铝化物具有许多导致它们获得高温结构应用的特点。它们含有足够的铝，以便能在氧化环境中生成致密并有保护功能的氧化铝(Al_2O_3)薄膜。它们都有低密度、相对高的熔点和良好的高温强度性能(表 3.14-47 和表 3.14-48)。

镍、铁和钛的铝化物，像其他的有序金属间化合物一样表现出常温下的脆性断裂和低塑性。还发现有相当数量的有序金属间化合物，如铝化铁在常温下表现出介质脆化。这种脆化就是由于空气中的水蒸气与金属间化合物中的活性元素(例如铝)发生反应并生成氢原子，当其进入金属就会造成过早断裂。于是，很差的抗断裂性以及有限的制造性会限制铝化物在大多数的情况里作为工程材料的应用。然而，近年来，可以通过加入合金元素和工艺方法来克服有序金属间化合物的脆化问题。这一工作的成功激励人们以同样的努力致力于提高其强度性能。其结果导致许多引人注目的金属间化合物合金的开发，它们具有有用的塑性和强度。



a)　　　　b)

图3.14-42　传统合金以及有序金属间化合物的原子排列

a）传统合金的无序晶体结构　b）长程有序金属间化合物的晶体结构

表3.14-47　铝化镍、铝化铁和铝化钛的性能

合金	晶体组织①	临界有序温度(T_c)		熔点(T_m)		材料密度	弹性模量	
		℃	℉	℃	℉	g/cm³	GPa	10^6psi
Ni_3Al	$L1_2$（有序fcc）	1390	2535	1390	2535	7.50	179	25.9
NiAl	B2（有序bcc）	1640	2985	1640	2985	5.86	294	42.7
Fe_3Al	$D0_3$（有序bcc）	540	1000	1540	2805	6.72	141	20.4
	B2（有序bcc）	760	1400	1540	2805	—	—	—
FeAl	B2（有序bcc）	1250	2280	1250	2280	5.56	261	37.8
Ti_3Al	$D0_{19}$（有序hcp）	1100	2010	1600	2910	4.2	145	21.0
TiAl	$L1_0$（有序四方）	1460	2660	1460	2660	3.91	176	25.5
$TiAl_3$	$D0_{22}$（有序四方）	1350	2460	1350	2460	3.4	—	—

①fcc，面心立方；bcc，体心立方；hcp，紧凑排列六方。

表3.14-48　铝化镍、铝化铁和铝化钛的特征和使用的温度上限

合金	特　征	最高使用温度/℃(℉)	
		强度使用极限	腐蚀使用极限
Ni_3Al	耐氧化、碳化和氮化，高温强度	1000(1830)	1150(2100)
NiAl	高熔点，高热导性，耐氧化、碳化和氮化	1200(2190)	1400(2550)
Fe_3Al	耐氧化和硫化	600(1110)	1100(2010)
FeAl	耐氧化、硫化、熔盐和碳化	800(1470)	1200(2190)
Ti_3Al	低密度，良好的比强度	760(1400)	650(1200)
TiAl	低密度，良好的比强度，耐磨性	1000(1830)	900(1650)

图3.14-43所示的晶粒结构显示了几种这类铝化物的有序原子排列。对于表3.14-47所列的大部分铝化物，临界有序化温度等于熔化温度。而其他的在稍微较低温度的情况下处于无序，以及Fe_3Al在成为无序之前要经历两种有序结构($D0_3$和$B2$)。许多铝化物都有一定的成分范围，但是当相对其化学计量偏离的增加时，其有序的程度会因此降低。添加的元素能溶入其内而不会丧失其有序结构。例如在Ni_3Al中，硅原子位于铝的位置上，钴原子在镍的位置上而铁原子在这两种位置上。在许多的情况里，所谓的金属间化合物都可以应用合金开发的基础，用以提高或优化性能以获得特定应用。

铝化镍

铝化镍相图表示两种稳定的金属间化合物，即 Ni_3Al 和 NiAl，处于富镍的一端（见图3.14-44）。化合物 Ni_3Al 具有 $L1_2$ 的晶体结构，由一种面心立方晶体结构衍生而成；NiAl具有 *B2* 结构，由一种体心立方晶体结构衍生而成（见图3.14-43）。由于它们晶体组织的不同，这两种铝化镍有着十分不一样的物理和力学性能。

Ni_3Al 铝化物

铝化物 Ni_3Al 之所以受到关注，是因为其在高温下具有极佳的强度和耐氧化性（表3.14-48）。金属间化合物长期以来都在这种镍基超合金的高温中作为强化的组分使用，镍基合金的突出的强度归功于在塑性无序基体中弥散析出有序γ′相（Ni_3Al）的析出细颗粒（见本手册第2篇第8章）。

单晶体 Ni_3Al 在常温下具有塑性，可是多晶体 Ni_3Al 却会因晶界的脆性断裂而遭受破坏，以致几乎没有任何塑性可言。甚至在晶界上探测不到任何杂质偏析的非常高纯度的材料里，这种效应也依然存在。对于这种特征的观察促使人们转而研究偏析物能否以别的方式起作用。

通过对偏析物的研究发现，少量（质量分数约0.1%）的硼添加剂不仅能消除 Ni_3Al 的脆性，而且使材料转变为具有塑性，在室温里所展现的塑性高达50%。然而硼的有效利用取决于化学计量，硼能够提高 Ni_3Al 塑性的效用仅限于含铝量（原子百分数）低于25%的合金。自从人们对于硼的微量合金化能使多晶体 Ni_3Al 更具塑性有了新的认识后，才使许多 Ni_3Al 合金制品得到开发。如表3.14-49所示，宏观量合金化添加包括铬、铁、锆和钼。这些合金元素的加入，用以提高强度、铸造性、热变形加工性以及耐腐蚀性。这些合金添加的效用在后面的段落里阐述。

屈服强度与温度的特殊关系。 Ni_3Al 属于其工程屈服强度（0.2%条件）随温度的提高而增加的许多金属间化合物合金中的一种。如图3.14-45所示，屈服应力的曲线是试验温度的函数。在较低的应变下，屈服强

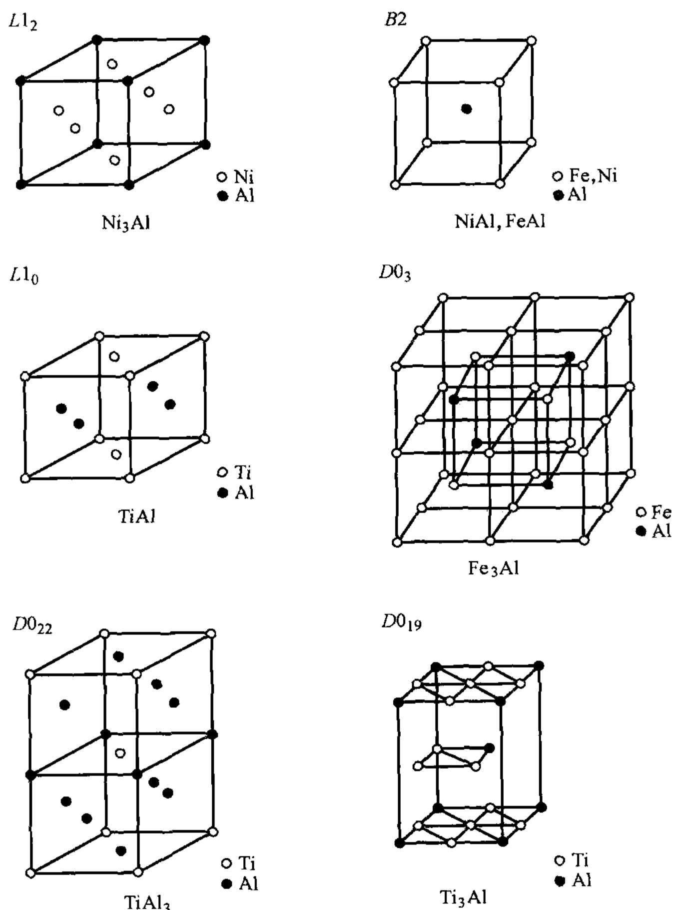


图3.14-43　铝化镍、铝化铁和铝化钛的晶体组织

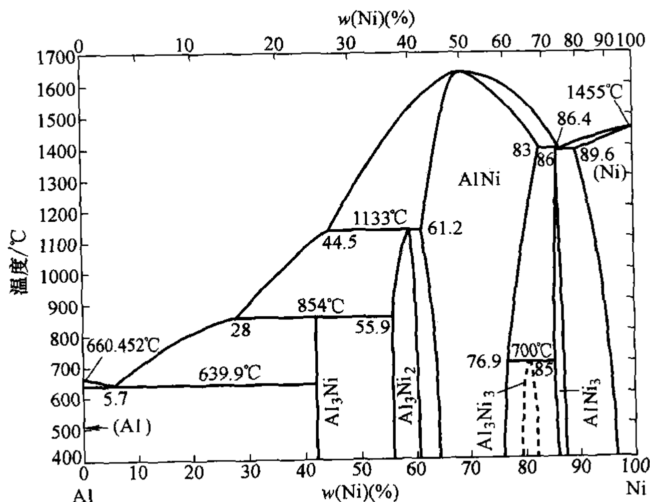


图3.14-44　镍铝相图上，富镍一端所示的两种NiAl和 Ni_3Al 化合物

表 3.14-49　所选 Ni_3Al 合金的名义成分

合　金①	化学成分(质量分数,%)						
	Al	Cr	Fe	Zr	Mo	B	Ni
IC-50	11.3	—	—	0.6	—	0.02	余量
IC-74M	12.4	—	—	—	—	0.05	余量
IC-218	8.5	7.8	—	0.8	—	0.02	余量
IC-218LZr	8.7	8.1	—	0.2	—	0.02	余量
IC-221	8.5	7.8	—	1.7	—	0.02	余量
IC-357	9.5	7.0	11.2	0.4	1.3	0.02	余量
IC-396M	8.0	7.7	—	0.8	3.0	0.01	余量

①由 Oak Ridge 国家实验室(Oak Ridge,TN)所采用的代号。

度较低的特殊屈服效应是因为极快的加工硬化而产生的。这种特殊的屈服特性，使 Ni_3Al 的高温强度超过许多工业用固溶合金(如型号 316 不锈钢和 Hastelloy 合金 X)(见图 3.14-45)。

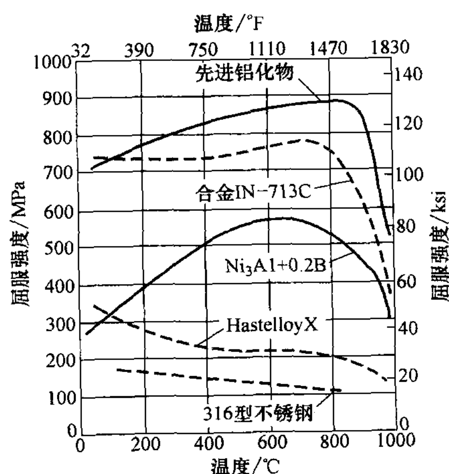


图 3.14-45　Ni_3Al 合金、两种超合金及类型 316 不锈钢的屈服强度与试验温度的关系

正如硼掺杂 Ni_3Al 一样，Ni_3Al 合金(表 3.14-49)的屈服强度也随温度的提高而提高。如图 3.14-46 所示，四种铝化镍合金的屈服强度都会在近 400～650℃(近 750～1200℉)的温度范围里增加到最大值。超过这个温度范围，其屈服强度就要下降。

力学性能。通过 Ni_3Al 的塑性和强度的研究，已经开发出应用于结构用途的具有塑性的铝化镍合金，其成分范围如下(原子百分数)：

Ni-(14～18)Al-(6～9)Cr-(1～4)Mo-(0.01～1.5)Zr/Hf-(0.01～0.20)B

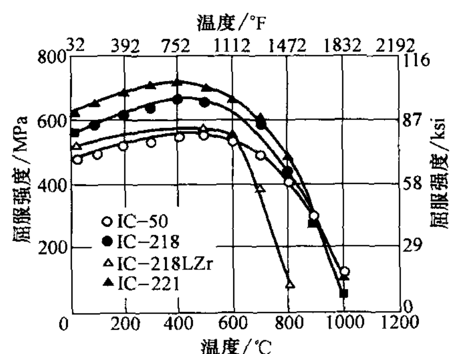
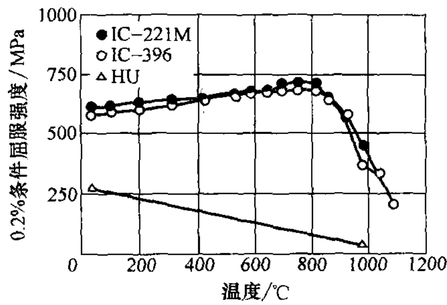


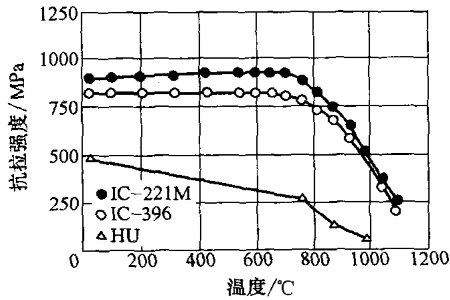
图 3.14-46　所选铝化镍依试验温度而不同的屈服强度。应变率，0.5mm/(mm·min)。合金成分见表 3.14-49

在这种铝化物合金中，加入(原子百分数)6%～9% Cr 可减少在高温里由氧化介质造成的介质脆化。锆和铪的加入能最大效果地提高相对于固溶硬化效果的高温强度。钼的加入可提高在常温和高温下的强度。硼的微量合金化能减少由潮湿引发的氢脆，并增强晶界的结合强度，从而大大提高其常温下的塑性。在某些情形里，为了进一步改善其硬度和耐腐蚀性，加入一定量[＜(原子百分数 20%)]的钴以及铁，以分别代替镍以及铝和镍。通常含有 5%～15% 的无序 γ 相的性能最佳的合金，具有在氧化气氛中减少环境脆化和提高高温下的蠕变性的功效。

图 3.14-47 比较了铸造 Ni_3Al 合金与铸造 HU 合金(Fe-20Cr-39Ni-2.5Si)的拉伸性能。从这张图可清楚地看到 Ni_3Al 合金将近两倍于室温的强度和六倍于 1000℃(1830℉)强度。图 3.14-48 是高铝合金 214 [(质量分数)4.5% Al] 与用铸造和粉末冶金(P/M)制造的 Ni_3Al 合金的拉伸性能比较。图 3.14-48 中的 P/M 制造的 IC-221 合金的强度明显高于合金 214 或铸造 Ni_3Al 基合金。

Ni_3Al 合金的蠕变性能是以其作为应力、温度和成分的函数为特征的。铪和锆的加入对于提高 Ni_3Al 的耐蠕变性是最有效的。图 3.14-49 所示是多晶体铝化镍合金 IC-221 的蠕变数据。Ni_3Al 合金的蠕变性能像镍基超合金一样对晶粒的大小很敏感，但是作为较粗晶粒材料(如铸造材料)的 Ni_3Al 合金有较好的耐蠕变性。在一些耐蠕变性很重要的用途里，当在高于 700℃(1290℉)的温度下，粗晶粒材料更是所希望的。含有耐熔元素如钽的单晶粒 Ni_3Al 合金的蠕变性能曾在 1000℃(1830℉)的高温下进行过研究。一般来说，Ni_3Al 具有可与大部分的镍基超合金相比拟的耐蠕变性能，但是在喷气发动机的涡轮机叶片应用





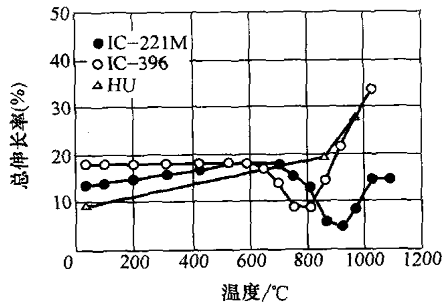
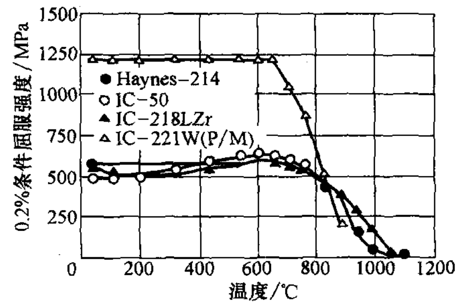
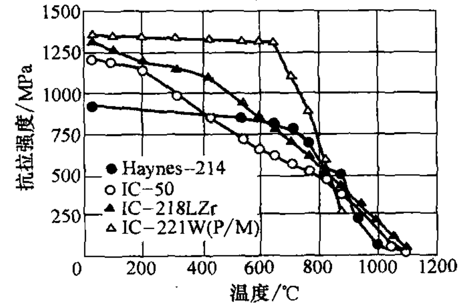


图3.14-47 Ni_3Al 合金与铸造HU合金的拉伸性能的比较

a) 0.2%条件屈服强度 b) 抗拉强度 c) 总伸长率





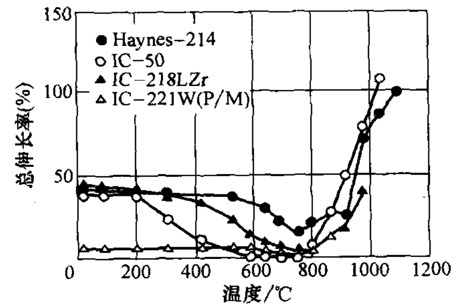


图3.14-48 铸造和P/M的 Ni_3Al 合金的拉伸性能与Haynes 214的比较

a) 0.2%条件屈服强度 b) 抗拉强度 c) 总伸长率

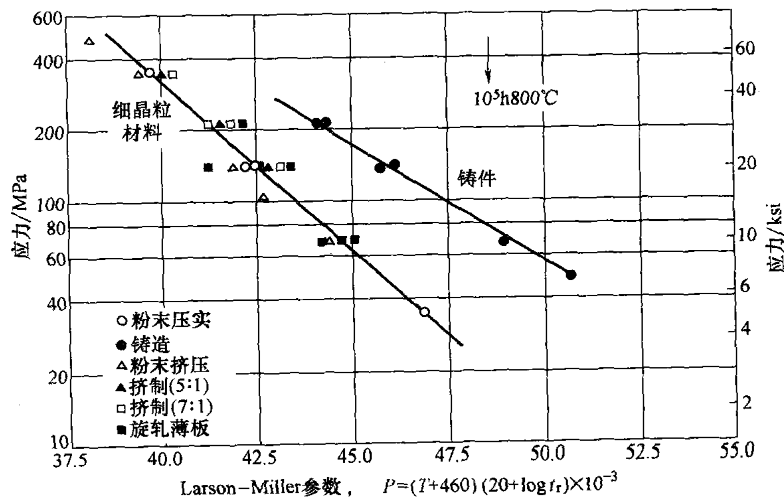


图3.14-49 Larson-Miller参数(P)曲线表示工艺对IC-221蠕变断裂性能的影响。试验是在650～870℃(1200～1600℉)里进行，时间范围为10～12464h。

上，它还不如一些先进的单晶体、镍基超合金。

在低于最小塑性范围的试验中，Ni_3Al 合金的疲劳和疲劳裂纹的生长都明显好于镍基超合金，室温里的疲劳裂纹生长如图 3.14-50 所示。Ni_3Al 和其他有序金属间化合物合金的良好耐疲劳性都归功于其细微的平面滑移和超晶格点阵位错结构。当温度超过 500℃（930℉）时，在氧化介质中的动力脆化会严重降低其耐疲劳性，然而这个问题可以通过在 Ni_3Al 中加入适量（如原子百分数 8%）的铬而得以缓解。当温度高达 800℃（1470℉）时，单晶体和定向凝固的 Ni_3Al 合金中疲劳/蠕变的相互作用成为其特征。有限的结果表明，在 760℃（1400℉）的温度下，含有铪和硼的单晶体 Ni_3Al 合金的性能更优于 Udimet115。

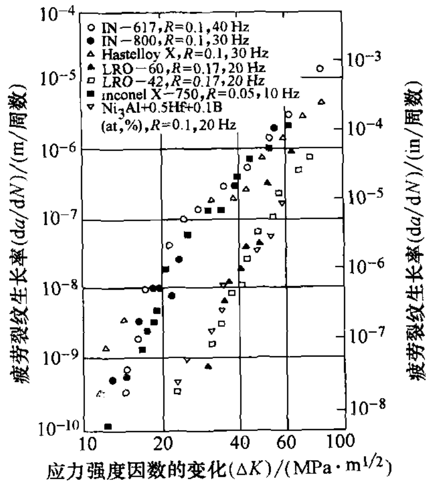


图 3.14-50 铝化镍［Ni-23.5Al-0.5Hf-0.1B（原子百分数，%）］、LRO 合金［$(Fe、Ni)_3(V、Ti)$］和几种高温合金在 25℃（80℉）的温度试验得到的裂纹生长率

耐腐蚀性。Ni_3Al 合金的耐氧化性和耐渗碳性的比较如图 3.14-51 和图 3.14-52 所示。从图 3.14-51

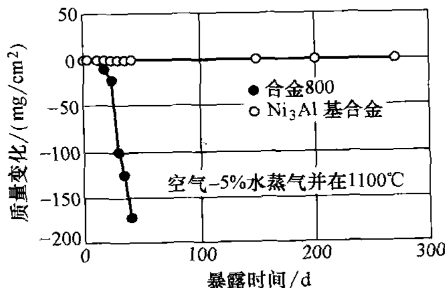


图 3.14-51 在 1100℃（2010℉）的温度和含 5% 水蒸气的空气中，Ni_3Al 合金与合金 800 的耐氧化性比较

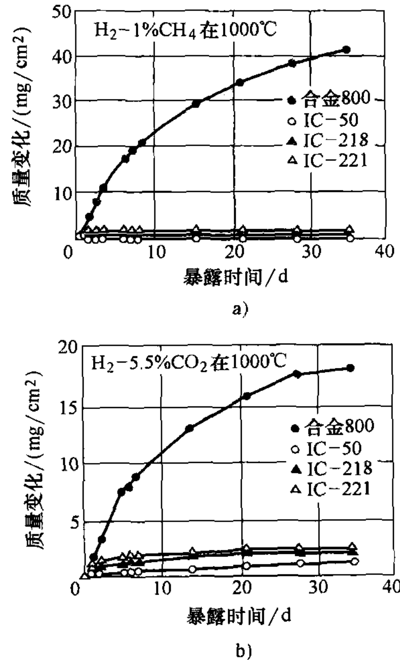


图 3.14-52 Ni_3Al 合金和合金 800 的耐碳化性的比较

a）氧化的渗碳气氛 b）还原的渗碳气氛

可以清楚地看出 Ni_3Al 合金能在其表面形成 Al_2O_3 的保护膜，故其耐氧化性显著好于无铝合金 800。在氧化或还原介质里的耐渗碳性也都很高。

工艺处理和制造。铝化镍零件可以用 P/M、铸造和铸锭冶金方法进行制造。图 3.14-48 和图 3.14-49 比较了工艺对铝化镍性能的影响。

借助于氩气或氮气的雾化生产铝化镍的粉末。将铝化镍粉末置于低碳钢的容器中并在 1100℃（2010℉）的温度下通过挤压使压缩比达到≥9:1，从而很容易地使其固结达到 100% 的密度。这种粉末也可以用热等静压进行固结。经挤压工艺固结的粉末可以在适当的温度和应变率条件下形成超塑性。

直接由液态金属制造成为近净形或净形的零件铸件，对于铝化镍的制造来说是一种非常理想的工艺方法。用于制造薄板的近净形方法中的一种就是让液态金属与一个转鼓直接接触。通过调节转鼓的速度控制薄板厚度。铸造成薄板有很高的塑性，并且通过冷轧可以明显提高其强度。

而采用传统的制造技术（如大型锭块的热轧）并没有效果，因为当靠近表面的区域冷却达到其塑性最小的温度范围时，将会产生大的晶间表面裂纹。等热锻造能为制造提供最佳可能性因为当温度超过 1000℃（1830℉）时合金会有一种超塑性的性能。传统的热锻还是可以应用于含有低于（原子百分数）

0.3% Zr或Hf的细晶粒合金。如果材料能铸成薄板或圆棒的形式，冷变形加工方法也有效用，这时可以将其进一步冷成形而无需重复的再结晶处理。

Ni_3Al基的合金具有对焊接裂纹的敏感性，然而只要精心焊接，其大部分的合金还是能够得到完好的焊缝。焊接速度应当降低，并且硼含量应限制在（原子百分数）0.1%左右，以防止发生热裂。氧气特别有害：焊接前合金表面的氧化皮应当除净，在焊接过程中要将气氛控制成为还原氧的。某些合金元素（如铁）能提高焊接性。潜在的用途（及其可开发的性能）包括：

- 热处理炉零件（超级耐渗碳、高温强度和耐热疲劳性）；
- 气体、水和蒸气燃机（优异的合金耐气蚀、浸蚀和氧化性）；
- 飞机紧固件（低密度和易于得到所需要的强度）；
- 汽车涡轮增压器（耐高疲劳和低密度）；
- 活塞和阀（耐磨性和通过高温氧化处理形成热障的能力）；
- 用于腐蚀性环境的能膨胀性连接的波纹管（优良的耐含水腐蚀）；
- 刀具（通过预氧化形成高温强度和耐磨性）；
- 金属型（具有通过高温氧化形成热障涂层的能力）。

NiAl 铝化物

含有超过（原子百分数）40%左右Ni的镍-铝会开始形成基于bcc晶格的单相B2型的有序晶体结构（见图3.14-43）。从物理性质方面来看，B2NiAl具有比$L1_2Ni_3Al$提供更多的高温应用的潜力。它有较高的熔点（1638℃或2980℉），低得多的密度（NiAl的$5.86g/cm^3$和Ni_3Al的$7.50g/cm^3$）和较高的弹性模量（294GPa或4.27×10^6psi相对于179GPa或25.9×10^6psi）。NiAl还能在400℃（750℉）以上表现出大幅度提高的塑性，而且600℃（1110℉）以上变得非常有塑性，因此NiAl的高温制造不会存在大问题。

力学性能。由于NiAl在常温下的塑性和高温下抗蠕变性都是很差的，故至今还不能作为一种随意可用的结构材料而得到广泛的应用。加入钴可使其具有一定的拉伸塑性。在富镍NiAl中，加入充足量的铁如具有B2组织的Ni-30Al-20Fe（均为原子百分数，%）能形成大约2%的塑性伸长率。而具有细晶粒组织的同样合金，当以快速凝固进行生产时还可以获得5%的伸长率。利用热挤压的两相组织（NiAl + Ni_3Al）的合金Ni-20Al-30Fe有22%的拉伸塑性，利用快速凝固生产时则，具有较低的塑性（10%~17%）。

钽、铌和铪三元元素的加入可以使蠕变性得到改善。以（原子百分数）15% Fe代替一些镍，也能降低NiAl的蠕变率。

NiAl的蠕变性还可以通过固溶硬化和颗粒强化得到大大改善。目前所能到得到的最佳抗蠕变性是用弥散的AlN增强NiAl获得的，而这种弥散体是应用NiAl粉末在液态氮中研磨引入的。

在严酷的工况条件下的高温结构应用中，可按下列合金成分（原子百分数，%）进行识别：

Ni-(49.0±0.6)Al-(1.0±0.8)Mo-(0.7±0.5)Nb/Ta/Zr/Hf-(0~0.5)Fe-(0.01~0.03)B/C

在这种情况下，合金是用熔化和铸造，然后在900至1050℃（1650至1920℉）温度里进行热挤压进行制备的。合金具有室温下高达700MPa（102psi）以及1000℃（1830℉）温度下的350MPa（31psi）的屈服强度。在816℃的空气中，其合金的蠕变率比二元NiAl低5~6个数量级。在加入NiAl的合金元素中，锆和铪的提高抗蠕变性效果最好，但是降低了这些合金的拉伸塑性。

耐腐蚀性。NiAl具有优异的高温耐氧化性。在20世纪的50、60年代，NiAl合金作为受热零件的涂层材料在腐蚀性环境中使用。NiAl的耐氧化性还可以通过加入钇及其他耐熔元素如铪和锆而得到进一步提高（见图3.14-53）。

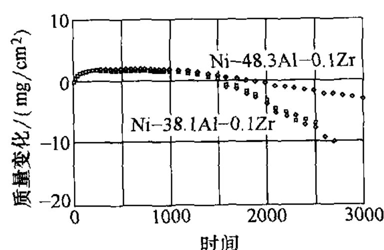


图3.14-53 NiAl +（原子百分数）0.1% Zr在1000℃（1830℉）下经长时间（3000h）的周期性氧化行为

铝化铁

成分范围为25%~50%时，形成bcc有序晶体结构的铝化铁。铝化物Fe_3Al在高达540℃（1000℉）温度下以有序DO_3结构存在，在540~760℃（1000~1400℉）之间以B2结构存在，超过760℃（1400℉）下则以无序结构而存在。随着铝的浓度增加到25%以上，从DO_3→B2的转变温度降低，而B2的有序温度升高。只有当铝含量达到36%以上并且单相区域延伸到大约（原子百分数）50% Al（FeAl）时，B2结构才是稳定的。图3.14-54为铝化铁的相图。

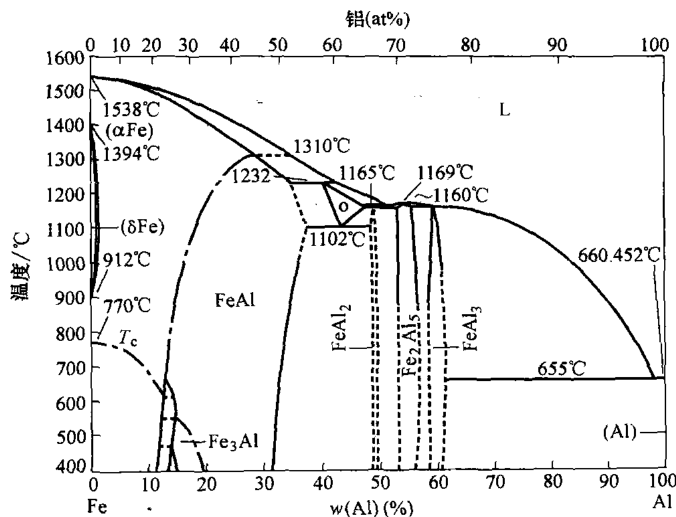


图3.14-54 二元铁-铝的相图

以 Fe_3Al 和 FeAl 为主体的铝化铁鉴于其独特的性能而具有成为结构用途的新型材料的开发潜力。这种潜力是以其能够在氧化和硫化的高温环境中形成 Al_2O_3 保护膜为依据的。除了优异的耐腐蚀能力外，这种铝化物还具有材料成本低、密度低和作为战略构件储备的优势。但是铝化物的主要缺点是它们在常温下的低塑性和低断裂强度，温度超过600℃(1110℉)时的低强度，以及对于介质脆化的敏感性。

铝化物 Fe_3Al 中的合金化作用。通过材料处理和合金元素的加入，进行晶粒结构细化对于提高铝化物 Fe_3Al(Fe-28Al 原子百分数,%)的塑性是很有用的。在 Fe_3Al 粉末中加入二硼化钛(TiB_2)对于减小晶粒的大小是非常有效的，而且它们将再结晶材料的拉伸塑性从2%提高到5%~7%。同样，材料热变形加工后再应力消除可以提高塑性高达18%。TiB_2颗粒的存在提高再结晶温度从650~1100℃(1200~2010℉)，这就意味着作为锻压材料甚至经过温度高达1000℃(1830℉)的暴露之后，仍将能保持其室温塑性。在600℃(1110℉)以上的这些材料的塑性还是非常高的，故能毫无困难地对它们使用传统的热变形加工技术。

这种铝化物的强度性能对于显微组织和铝的含量也很敏感。铝的含量超过25%，其室温屈服强度就随之急剧下降。加入 TiB_2 能减小再结晶材料的晶粒尺寸并稳定锻压组织，从而有效提高其强度并使其能承受较高的温度。

一种新开发的 Fe_3Al 合金表明，通过熔化、铸造和热轧加工所得到的铝化物就是因其含铝量从25%提高到(原子百分数)28%或30%并加入2%~6%的铬，从而使其塑性得以显著提高。铝浓度的增加会急剧降低铝化物的屈服强度。铬的有利作用在于改善其表面成分并减少水蒸气与铝原子之间发生的反应，即减少介质脆化的作用。用铬改性的 Fe_3Al 合金经过形变热处理并加入钼、铌合金元素后，其力学性能得到进一步的提高。有些这种合金能展现室温下15%以上的塑性和在600℃(1110℉)温度下接近500MPa(7205psi)的屈服强度。这种具有塑性的 Fe_3Al 合金的强度超过奥氏体和铁素体钢，如314型的不锈钢和Fe-9Cr-1Mo钢。耐熔元素也能有效增强 Fe_3Al 合金的蠕变性能。

表3.14-50所列是几种新近开发的 Fe_3Al 合金。图3.14-55中，比较了锻压 Fe_3Al 合金与经氧化物弥散强化的(ODS)MA-956铁基超合金的拉伸和蠕变性能。它们的拉伸性能相似，但是 Fe_3Al 合金的蠕变性能低了许多。

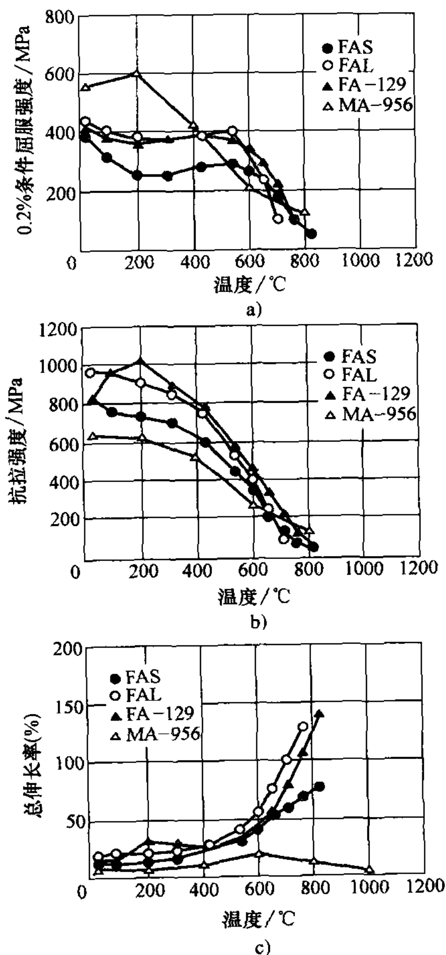


图3.14-55 锻压 Fe_3Al 合金与 MA-956(Fe-20Cr-4.5Al-0.5Ti-0.5Y_2O_3)**的拉伸性能的比较**。Fe_3Al 合金的化学成分见表3.14-50。

a) 0.2%条件屈服强度 b) 抗拉强度 c) 总伸长率

表 3.14-50 所选铝化物 Fe_3Al 的化学成分

合金①	化学成分(质量分数,%)						
	Al	Cr	B	Zr	Nb	C	Fe
FAS	15.9	2.20	0.01	—	—	—	余量
FAL	15.9	5.5	0.01	0.15	—	—	余量
FA-129	15.9	5.5	—	—	1.0	0.05	余量

①橡树岭国家实验室采用的代号，Oak Ridge，TN

铝化物 FeAl 中的合金化作用。含有(原子百分数)40%或以上铝的铝化物 FeAl，在室温下也会因晶间断裂而损坏，故几乎没有任何拉伸塑性。加入少量的硼(0.05%~0.2%)能防止晶界断裂的发生，并使 Fe-40Al 的塑性略有提高(~3%)，然而 Fe-50Al 却不在其列。硼在 FeAl 中的有利作用虽不如在 Ni_3Al 中那么惊人，但还是够明显的。掺硼铝化物 FeAl 保持低的塑性，是由于其合金还是会被试验环境(空气)所脆化。已经发现当在干燥的氧气中试验时，由于能避免介质脆化而使掺硼 FeAl(40% Al)表现出高塑性(18%)。

硼的加入还能提高 FeAl 的高温强度，尤其当含有铌和锆时。例如，在 825℃(1520℉)的温度下加入 0.1% Zr 和 0.2% B，能使其蠕变率降低一个数量级。

最新的合金开发研究集中在基础合金 Fe-36Al(原子百分数,%)中加入如表 3.14-51 所列的合金元素。提高 FeAl 合金的高温强度和室温塑性的最为有效的元素是在其合金组合中加入少量的钼、锆和硼，多元素的综合效果远超过其单一元素的效果。而锆和硼的加入对于提高室温塑性是非常重要的，在一种代号为 FA-362 的合金(表 3.14-51)里加入 Mo + Zr + B，能使其产生在 600℃(1110℉)下的最佳抗拉强度和蠕变断裂强度。FA-362 还表现出在空气中的最高室温塑性(11.8%)。经 700℃(1290℉)的预氧化处理，还能进一步将拉伸塑性提高到 14.7%。图 3.14-56 所示是表 3.14-51 所列的不同 FeAl 合金与两种高速工具钢的高温屈服强度的比较。

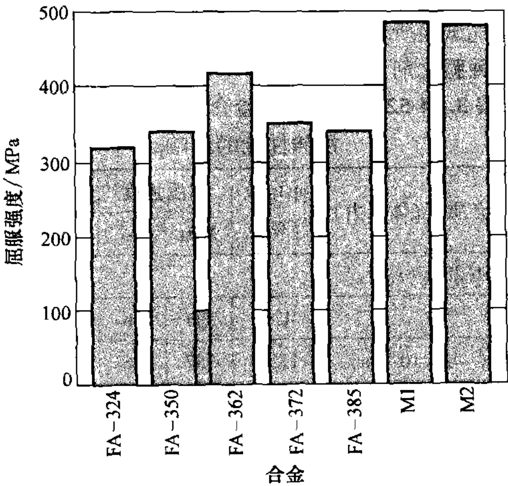


图 3.14-56 几种 FeAl 合金在 600℃(1110℉)的空气中拉伸试验的屈服强度。其试件为薄板冲制，试验前经 850~900℃(1560~1650℉)的热轧和 700~800℃(1290~1470℉)为时 1h 的热处理。合金成分见表 3.14-51。

表 3.14-51 所开发的 FeAl[Fe-(原子百分数)35.8% Al]合金的化学成分

合金①	化学成分(原子百分数,%)						
	Cr	Nb	Ti	Mo	Zr	C	B
FA-350	—	—	—	—	0.05	—	0.24
FA-362	—	—	—	0.2	0.05	—	0.24
FA-372	—	—	—	0.2	0.05	—	—
FA-383	—	—	—	—	0.05	—	—
FA-384	2	—	—	0.2	0.05	—	—
FA-385	—	—	—	0.2	0.05	0.13	—
FA-386	—	—	—	0.2	0.05	0.24	—
FA-387	—	—	—	0.2	—	—	0.24
FA-388	—	—	—	0.2	—	0.25	—
FA-385M1	—	—	—	0.2	0.05	0.13	0.01
FA-385M2	—	—	—	0.2	0.05	0.13	0.021
FA-385M3	2	—	—	0.2	0.05	0.13	—
FA-385M4	—	0.5	—	0.2	0.05	0.13	—
FA-385M5	2	0.5	—	0.2	0.05	0.13	—
FA-385M6	2	0.5	—	0.2	0.05	0.25	—
FA-385M7	2	0.5	—	0.2	0.1	0.25	—
FA-385M8	2	0.5	0.05	0.2	0.05	0.13	—
FA-385M9	2	0.5	0.05	0.2	0.05	0.25	—
FA-385M10②	2	0.5	0.05	0.2	0.05	0.13	—
FA-385M11③	2	0.5	0.05	0.2	0.05	—	—

①橡树岭(Oak Ridge,TN)国家实验室采用的代号。 ②也含(原子百分数)0.5% Ni、0.3% Si 和 0.016% P。 ③也含(原子百分数)0.25% W。

环境脆化。知道铝化铁在常温里发生脆化已经有45年了，然而脆化的主要原因近几年才搞清楚。表3.14-52所列的数据表明试验介质对FeAl(36.5% Al)和Fe_3Al(28% Al)的室温拉伸性能的影响。屈服强度对于介质并不敏感，但抗拉强度一般与拉伸塑性相关，而后者强烈地取决于试验介质。在空气中试验的铝化物的塑性为2%~4%。在干燥氧气中试验的FeAl的塑性为17.6%，而在真空和干燥氧气中试验的Fe_3Al的塑性为12%~13%。水蒸气试验进一步增强由空气试验所证明的低塑性，由此表明空气中的潮湿是一种脆化剂。

表3.14-52　所选的试验介质对铝化铁的室温拉伸性能的影响

试验介质(气体压力)	伸长率(%)	屈服强度		抗拉强度	
		MPa	ksi	MPa	ksi
Fe_3Al(28% Al)①					
空气	4.1	387	56	559	81
真空(~1×10^{-4}Pa)	12.8	387	56	851	123
氩气+4% H_2(6.7×10^4Pa)	8.4	385	55.8	731	106
氧气(6.7×10^4Pa)	12.0	392	56.8	867	126
水蒸气(1.3×10^3Pa)	2.1	387	56	475	69
FeAl(36.5% Al)①					
空气	2.2	360	52.2	412	60
真空(<1×10^{-4}Pa)	5.4	352	51	501	73
氩气+4% H_2(6.7×10^4Pa)	6.2	379	55	579	84
氧气(6.7×10^4Pa)	17.6	360	52.2	805	117
水蒸气(67Pa)	2.4	368	53.4	430	62

①所有的试件都进行退火：900℃(1650℉)1h+700℃(1290℉)2h。

预计脆化也就是在金属表面发生的以下化学反应：



$$2Al+3H_2O \rightarrow Al_2O_3+6H^++6e^-$$

水蒸气与铝原子在裂纹尖角处的反应导致原子氢的形成并入侵金属，从而造成裂纹的扩张。事实是屈服强度(表3.14-52)对塑性并不具敏感性，而且试验环境是构成在别的有序金属间化合物中所观察到的氢脆的机制。

耐腐蚀性。如早先所述，铝化铁具有高度的高温耐氧化性和耐硫化性。耐氧化性一般随含铝量的增加而提高，当铝化物在900℃(1650℉)以上的温度里氧化时，其主要生成物是α-Al_2O_3和微量氧化铁。含有达(原子百分数)1% Hf、Zr和B的Fe-40Al在高达1000℃(1830℉)的温度下的循环氧化也不会发生剥蚀。经过700和870℃(1290和1600℉)试验的铝化物试件除了形成具有位于干涉颜色范围厚度的氧化物薄层之外，并不显示出有任何硫化介质的侵蚀。如图3.14-57所示，当铝化铁合金在800℃(1470℉)的严重硫化介质中试验时，其腐蚀率低于传统的Fe-Cr-Ni合金(包括涂层材料)两个数量级。此外，超过30% Al的铝化物在650℃(1200℉)的熔化硝酸盐介质中是非常耐腐蚀的。由于其优异的耐腐蚀性，铝化铁正考虑被应用于化学空分设备、汽车排放系统、浸没式加热器、热交换器、催化转化罐、化工生产系统以及煤转化系统中的熔化盐系统里。

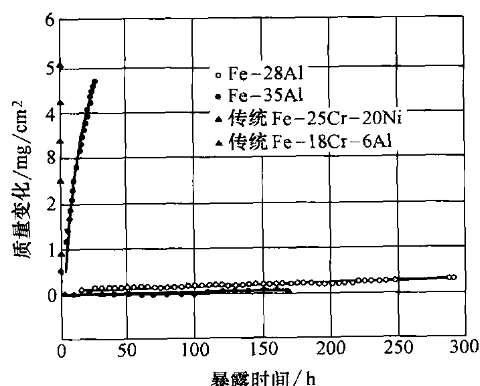


图3.14-57　铝化铁的腐蚀行为与传统铁基合金Fe-18Cr-6Al(涂层材料)和Fe-25Cr-20Ni的比较。所有的材料都暴露在800℃(1470℉)的严重硫化介质中。

铝化钛

基于Ti_3Al和TiAl的铝化钛，因为其低密度对于先进的航天发动机零件(新型压缩机或涡轮流量计)、航空航天飞行器的机架以及汽车阀和涡轮增压器的应用来说是极佳的候选材料。表3.14-47列出铝化钛的特征并与其他铝化物相对照，铝化钛的蠕变性与传统钛合金的比较如图3.14-58所示。尽管缺乏抗断裂性(低塑性、断裂韧性和疲劳裂纹生长率)，铝化钛Ti_3Al(α-2)和TiAl(γ)还是有很大的性能提高潜力。表3.14-53将这些铝化物与传统钛合金和超合金的性能进行比较。由于它们具有较传统钛合金更低的扩散速率，铝化钛的这种特性能增强其高温性能，例如强度的保持性和耐蠕变、应力断裂以及疲劳性。

表 3.14-53 铝化钛、钛基传统合金和镍基超合金的性能

性　能	传统钛合金	Ti_3Al	TiAl	镍基耐热合金
密度/(g/cm^3)	4.5	4.1~4.7	3.7~3.9	8.3
模量/GPa (10^6psi)	96~100 (14~14.5)	100~145 (14.5~21)	160~176 (23.2~25.5)	206(30)
屈服强度① /MPa(ksi)	380~1150 (55~167)	700~990 (101~144)	400~650 (58~94)	—
抗拉强度① /MPa(ksi)	480~1200 (70~174)	800~1140 (116~165)	450~800 (65~116)	—
蠕变极限 /℃(℉)	600(1110)	760(1400)	1000(1830)	1090 (1995)
氧化极限 /℃(℉)	600(1110)	650(1200)	900(1650)	1090 (1995)
室温塑性(%)	20	2~10	1~4	3~5
高温塑性(%)	高	10~20	10~60	10~20
晶体结构	hcp/bcc	$D0_{19}$	$L1_0$	fcc/L_2

①室温下。

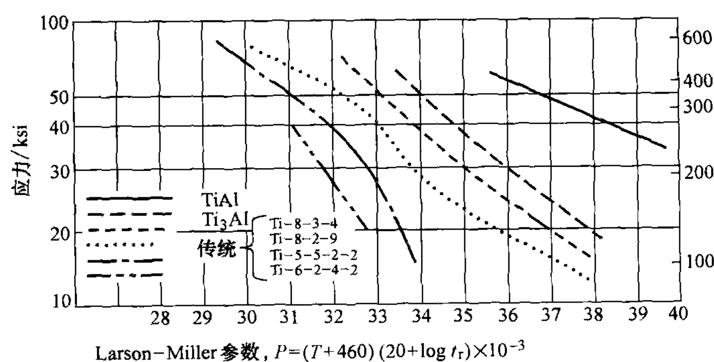


图 3.14-58 传统钛合金和铝化钛金属间化合物的蠕变性状的比较

铝化钛除了其在常温下的低塑性之外的又一个负面特性，就是它在高温下的耐氧化性低于所需要的。铝化钛是以在高温下形成 TiO_2 的强烈趋势为其特征，而不是那种有保护性的 Al_2O_3。鉴于这种趋势，提高这种铝化物的最高使用温度的一个关键因素就是在维持一定的抗蠕变性并保持高温下强度的同时，要提高它们的耐氧化性。

α-2 合金

α-2(Ti_3Al)金属间化合物具有一种有序 $D0_{19}$ 的结构(见图 3.14-43)。如钛-铝相图(见图 3.14-59)所示，Ti_3Al 有很大成分范围的稳定性，即含铝量(原子百分数)从 22%~39%。含铝量为(原子百分数)32%的这种化合物在 1180℃(2155℉)温度下是相应无序的。化学计量成分的 Ti-25Al 在高达 1090℃(1995℉)温度下都很稳定。

已开发的半工业用和试验性的 α-2 合金是双相(α-2+β/B2)的，含有(原子百分数)23%~25% Al 和 11%~18% Nb。目前具有工程意义的合金成分为 Ti-24Al-11Nb、Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo、Ti-25Al-17Nb-1Mo 以及改性合金成分如 Ti-24.5Al-6Nb-6(Ta、Mo、Cr、V)。增加铌含量一般能增强大多数的材料性能，尽管过量的铌会降低其蠕变性能。可用特定的元素代替铌来提高强度(钼、钽或铬)、抗蠕变性(钼)和耐氧化性(钽、钼)。然而作为力学性能特别是拉伸、疲劳和蠕变性的全方位优化，必须保持对显微组织的控制。显微组织特征例如初始 α-2 的晶粒大小及其体积比和二次 α-2 片的形貌及厚度都是随所采用的形变热处理工艺而变化。

典型的力学性能。特指表 3.14-54 所列的许多 α-

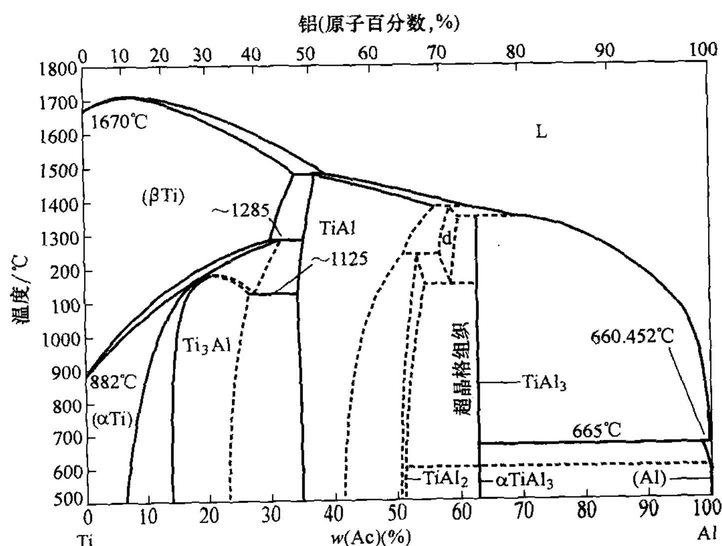


图 3.14-59 钛-铝二元相图

2合金。借助含有β稳定化元素的合金化，Ti_3Al所生产的双相合金能使其强度翻倍。混合双相的界面强化对于提高强度显得尤为重要，但其他强化因素如长程序列、固溶及织构效应也都起作用。

表3.14-54　具有不同显微组织的α-2Ti_3Al合金的性能

合　金	显微组织①	屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)	平面应变断裂韧度(K_{Ic})		蠕变断裂②
		MPa	ksi	MPa	ksi		MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$	
Ti-25Al	E	538	78	538	78	0.3	—	—	—
Ti-24Al-11Nb	W	787	114	824	119	0.7	—	—	44.7
	FW	761	110	967	140	4.8	—	—	—
Ti-24Al-14Nb	W	831	120	977	142	2.1	—	—	59.5
Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo	W	825	119	1042	151	2.2	13.5	12.3	>360
	FW	823	119	950	138	0.8	—	—	—
	C+P	745	108	907	132	1.1	—	—	—
	W+P	759	110	963	140	2.6	—	—	—
	FW+P	942	137	1097	159	2.7	—	—	—
Ti-24.5Al-17Nb	W	952	138	1010	146	5.8	28.3	25.7	62
	W+P	705	102	940	136	10.0	—	—	—
Ti-25Al-17Nb-1Mo	FW	989	143	1133	164	3.4	20.9	19.0	476

①E，等轴α-2；W，魏氏；FW，细魏氏；C，晶团组织；P，初始α-2晶粒。　②在650℃(1200℉)和380MPa(55ksi)的条件下发生断裂的时间(h)。

一种细的、含有少量初始α-2晶粒的魏氏(Widmanstätten)显微组织比粗糙的魏氏显微组织或顺序排列的针状α-2形貌能表现出更好的塑性。一项关于Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo显微组织对蠕变性状的影响的详细分析表明晶团型显微组织比其他显微组织表现出更好的抗蠕变性。Ti-25-10-3-1在其稳态体系里的抗蠕变性比传统合金Ti-1100(Ti-6Al-3Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si)提高十倍，并超过Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si两个数量级。然而，Ti-25-10-3-1会在2h之内达到0.4%的蠕变应变。

加入硅和锆也能提高抗蠕变性，但是当将铝含量提高到(原子百分数)25%和将β-稳定化元素限制在(原子百分数)12%左右时，就能获得最为显著的提高。然而，Ti-24.5Al-17Nb-1Mo合金的断裂寿命超过其他α-2合金。

正交晶系合金

在较高铌含量的情况下，α-2相会变成一种基于Ti_2AlNb(O相)的新型有序正交晶体结构。这可以在成分接近Ti-(21-25)Al-(21-27)Nb(原子百分数,%)的铝化钛中观察到。

虽然正交晶系合金的使用温度比在“γ合金”一节中叙述过的γ铝化物(在大约650℃,或1200℉)的低，但是它们具有高得多的绝对强度。据报告，其室温抗拉强度约为1380MPa(200ksi)以及接近5%的伸长率。此外，Ti-21Al-25Nb(原子百分数,%)在700℃(1290℉)的0.2%条件屈服强度为590～690 MPa(86～100ksi)，也曾被报道过。这种材料的室温屈服强度约为1070 MPa(155ksi)以及3.5%的伸长率。

具有拉伸、蠕变和断裂韧度最佳组合的有序正交晶系合金是一种双相O+β合金例如Ti-22Al-27Nb(原子百分数,%)。表3.14-55列出了这类合金的高温拉伸性能。

γ合金

γ-TiAl相是一种$L1_0$的有序面心四方晶体结构(见图3.14-43)，它具有很大依赖温度稳定性的范围(原子百分数49%～66% Al)(见图3.14-59)。γ-TiAl相能明显地保持其有序，直到其熔点约1450℃(2640℉)。

具有工程重要性的γ合金包含(原子百分数)约45%～48% Al和(原子百分数)1%～10% M，M为下列元素中至少一种：钒、铬、锰、铌、钽和钨。这些合金分成两大类：单相(γ)合金和双相(γ+α-2)材料。当温度为1000℃(1830℉)并含铝量为(原子百分数)约49%时，出现(α-2+γ)/γ相边界，还要取决于溶质M的种类和含量。单相γ合金含有第三种合金元

表 3.14-55　双相(O+β)合金[Ti-22Al-27Nb(原子百分数,%)]的拉伸性能

试验温度		时效处理	拉伸屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)
℃	℉		MPa	ksi	MPa	ksi	
22	72	无	1056	153	1152	167	3.4
		无	1028	149	1083	157	2.2
		540℃(1000℉), 100h	1083	157	1166	169	3.3
		540℃(1000℉), 100h	1090	158	1159	168	2.8
		650℃(1200℉), 100h	1090	158	1145	166	2.6
		650℃(1200℉), 100h	1076	156	1145	166	2.5
		760℃(1400℉), 100h	987	143	1076	156	5.2
		760℃(1400℉), 100h	966	140	1083	157	5.0
540	1000	无	849	123	1007	146	14.3
		无	856	124	1049	152	14.3
		540℃(1000℉), 100h	876	127	1049	152	17.9
		540℃(1000℉), 100h	890	129	1070	155	16.1
650	1200	无	794	115	938	136	14.3
		无	807	117	945	137	12.5
		650℃(1200℉), 100h	794	115	938	136	10.7
		650℃(1200℉), 100h	807	117	952	138	10.7
760	1400	无	559	81	787	114	10.7
		无	593	86	766	114	14.3
		760℃(1400℉), 100h	462	67	649	94	21.4
		760℃(1400℉), 100h	552	80	731	106	16.1

素如铌或钽，以此增加强度和进一步提高耐氧化能力。在双相合金中的第三种合金元素能提高塑性(钒、铬和锰)，提高耐氧化性(铌和钽)或提高其组合性能。

材料工艺。γ合金可以采用传统方法制造，包括铸造、铸锭冶金和P/M。重要的合金化/熔化工艺包括感应渣壳熔炼、真空电弧熔炼和等离子熔炼。其他正在研究的方法包括机械合金化、喷射成形、冲击反应合成、物理气相沉积和将单体薄板热压和轧制成为多层复合薄板。借助于适当的形变热处理工艺(TMP)，名义γ合金的相组织形态经控制成为层状或等轴状的形态，或者其两者的混合体。

力学性能。表3.14-56列出γ合金的拉伸性能和断裂韧度，并且是工艺/显微组织和温度的函数。三元合金Ti-48Al加上约1%~3% V、Mn或Cr，以此增强其塑性，但Ti-48Al合金若加上约1%~3% Nb、Zr、Hf、Ta或W，其塑性就要低于二元的Ti-48Al。Ti-56Al的脆性-塑性的转变(BDT)发生在700℃(1290℉)的温度里，含铝量减少该转变温度也随之降低。一般室温塑性的提高会导致BDT温度的下降。超过BDT温度，其塑性随温度快速提高，到1000℃(1830℉)时，大多数塑性γ合金组成的塑性都接近100%。屈服强度和拉伸塑性随试验温度而变化的趋势带如图3.14-60所示。γ合金的弹性模量的范围为160~176GPa(23×10^6至25.5×10^6psi)，并随温度升高而缓减。

表 3.14-56　γ铝化钛在空气中试验的拉伸性能和断裂韧度值

合金代号及成分(原子百分数,%)	工艺和显微组织	温度		屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)	断裂韧度①K_q	
		℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa·m^{1/2}	ksi·in^{1/2}
48-1-(0.3C)/Ti-48Al-1V-0.3C-0.20	锻造+HT/重复	RT	RT	392	57	406	59	1.4	12.3	11.2
		437	819	—	—	—	—	—	22.8	20.7
		760	1400	320	46	470	68	10.8	—	—
	铸造/重复	RT	RT	490	71	—	—	—	24.3	22.1

（续）

合金代号及成分（原子百分数，%）	工艺和显微组织	温度		屈服强度		抗拉强度		伸长率（%）	断裂韧度①K_q	
		℃	℉	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa · $m^{1/2}$	ksi · $in^{1/2}$
48-1（0.2C）/Ti-48Al-1V-0.2C-0.140	锻造+HT/重复+NL	RT	RT	480	70	530	77	1.5	—	—
		815	1500	360	52	450	65	—	—	—
48-2-2/Ti-48Al-2Cr-2Nb	铸造+HIP+HT/重复	RT	RT	331	48	413	60	2.3	20～30	18～27
		760	1400	310	45	430	62	—	—	—
	挤压+HT/重复	RT	RT	480	70	—	—	3.1	—	—
		760	1400	403	58	—	—	40	—	—
		870	1600	330	48	—	—	53	—	—
	挤压件+HT/FL	RT	RT	454	66	—	—	0.5	—	—
		760	1400	405	59	—	—	3.0	—	—
		870	1600	350	51	—	—	19	—	—
	P/M 挤压+HT/NL	RT	RT	510	74	597	87	2.9	—	—
		700	1290	421	61	581	84	5.2	—	—
G1/Ti-47Al-1Cr-1V-2.6Nb	锻造+HT/重复	RT	RT	480	70	548	79	2.3	12	10.8
		600	1110	383	56	507	74	3.1	16	14.6
		800	1470	324	47	492	71	55	—	—
	锻造+HT/FL	RT	RT	330	48	383	56	0.8	30～36	27～33
		800	1470	290	42	378	55	1.5	40～70	36～64
住友/Ti-45Al-1.6Mn	反应烧结/NL	RT	RT	465	67	566	82	1.4	—	—
		800	1470	370	54	540	78	14	—	—
ABB 合金/Ti-47Al-2W-0.5Si	铸造+HT/重复	RT	RT	425	62	520	75	1.0	22	20
		760	1400	350	51	460	67	2.5	—	—
47XD/Ti-47Al-2Mn-2Nb-0.8TiB_2	铸造+HIP+HT/NL+TiB_2	RT	RT	402	58	482	70	1.5	15～16	13.6～14.6
		760	1400	344	50	458	66	—	—	—
45XD/Ti-45Al-2Mn-2Nb-0.8TiB2	铸造+HIP+HT	RT	RT	570	83	695	101	1.5	15～19	13.6～17.3
		600	1110	440	64	650	94	—	—	—
		760	1400	415	60	510	74	19	—	—
GE 合金 204b/Ti-46.2Al-xCr-y(Ta,Nb)	铸造+HIP+HT/NL	RT	RT	442	64	575	83	1.5	34.5	31.4
		760	1400	382	55.4	560	81	12.4	—	—
		840	1545	381	55.2	549	80	12.2	—	—
Ti-47Al-2Nb-2Cr-1Ta	铸造+HIP+HT/重复	RT	RT	430	62	515	75	1.0	—	—
		800	1470	363	53	495	72	23.3	—	—
		870	1600	334	48	403	58	14.6	—	—
Ti-47Al-2Nb-1.75Cr	PM 铸造+HIP+HT	RT	RT	429	62	516	75	1.4	—	—
		760	1400	286	41	428	62	13.3	—	—
		815	1500	368	53	531	77	23.3	—	—

（续）

合金代号及成分（原子百分数，%）	工艺和显微组织	温度 ℃	温度 ℉	屈服强度 MPa	屈服强度 ksi	抗拉强度 MPa	抗拉强度 ksi	伸长率（%）	断裂韧度①K_q MPa·m$^{1/2}$	断裂韧度①K_q ksi·in$^{1/2}$
合金 7/Ti-46Al-4Nb-1W	挤压+HT/NL	RT	RT	648	94	717	104	1.6	—	—
		760	1400	517	75	692	100	—	—	—
合金 K5/Ti-46.5Al-2Cr-3Nb-0.2W	锻造+HT/重复	RT	RT	462	67	579	84	2.8	11	10
		800	1470	345	50	468	68	40	—	—
	锻造+HT/RFL	RT	RT	473	69	557	81	1.2	20~22	18~20
		800	1470	375	54	502	73	3.2	—	—
		870	1600	362	53	485	70	12.0	—	—

注：HT，热处理；HIP，热等静压；P/M，粉末冶金；PM，金属型（铸造）；NL，接近层状；FL，全层状；RFL，精炼全层状；RT，室温。

①K_q = 暂定 K_{Ic} 值。

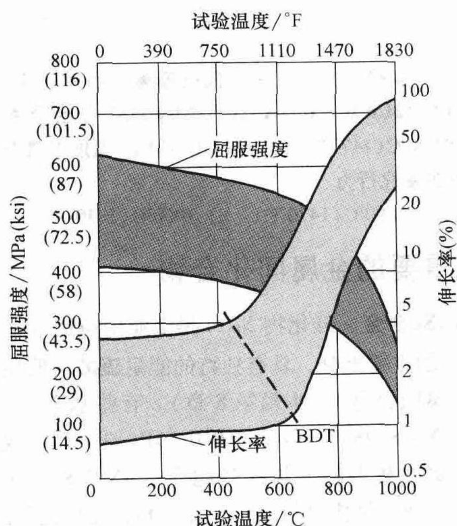


图3.14-60　γ-TiAl合金的屈服强度和伸长率与试验温度的函数关系。 BDT，即脆性-塑性的转变温度

低周疲劳实验表明在800℃（1470℉）的温度以下的细晶粒大小能延长疲劳寿命。γ合金的疲劳裂纹生长速率比超合金的更快，即使当其密度经均质化。在常温下断裂韧度和抗冲击性都很低，但断裂韧度随温度升高而提高，例如Ti-48Al-1V-0.1C在室温下的平面应变断裂韧度（K_{Ic}）为24MPa·m$^{1/2}$（21.8ksi·in$^{1/2}$）。断裂韧度强烈地取决于层状相所占的体积分数。在断裂韧度为12 MPa·m$^{1/2}$（10.9ksi·in$^{1/2}$）的双相四元γ合金中所观察到的细组织几乎全部都是γ，当存在着大体积分数的片状晶粒时，K_{Ic}大于20MPa·m$^{1/2}$（18.2ksi·in$^{1/2}$）。经密度的均质化的γ合金的蠕变性能将好于超合金的，但是它们受合金化学和TMP的严重影响。增加含铝量和加入钨或碳，能提高其抗蠕变性。增加片状组织的体积比也能增强其抗蠕变性，但会降低其塑性。由起始加载和初始蠕变产生的延伸所达到的蠕变应变程度应予以关注，因为它能超过设计规定的零件最大蠕变应变限度。

复合材料。 γ铝化钛也可以作为钛基体复合材料的基体使用。现已开发熔模铸造Ti-47Al-2Nb-2Mn（原子百分数，%）+（体积分数）0.8% TiB_2和Ti-45Al-2Nb-2Mn（原子百分数，%）+（体积分数）0.8% TiB_2 XD（放热弥散沉淀）合金。这些合金原位形成二硼化钛，由其造就晶粒的细化以及由此而得的力学和物理性能有相当的增强。由此得到增强的XD型较之传统金属基体复合材料具有更好的热稳定性，还有可能在微米级的范围里（体积分数0.8%，TiB_2实际上就是起晶粒细化剂的作用）使其增强。XD铝化物具有极佳的疲劳性能，其疲劳极限处于屈服强度的95%~115%的范围内（非XDγ合金也展现类似的特性）。其高疲劳强度是由于前面提到的显微组织的细化和在加载过程中发生的应变时效作用所致。有一家主要的燃气轮机发动机制造商正在研究XDγ-铝化物的叶片，以期应用于目前使用IN-713叶片的飞机发动机中的最后一级低压涡轮机上。其使用的温度范围为650~700℃（1200~1290℉）。XD铝化钛复合材料还应用于导弹的尾翼。超过600℃（1110℉），Ti-47Al-2V+7（体积分数）7% TiB_2的强度高于17-4PH钢，并且约750℃（1380℉）的模量也较高。这些性能的改善提高了导弹尾翼的使用温度，从而导致利用XD复合材料的再设计。表3.14-56列出了XD复合材料的拉伸

性能。

耐氧化性。虽然γ类铝化钛的耐氧化性和耐间隙原子(氧、氮)脆化性超过α-2和正交晶体(Ti_2AlNb)类铝化钛，但是其介质寿命仍然要予以关注，尤其在温度约为750～800℃(1380～1470℉)的空气中。如前文所述，这是因为所有的铝化钛都是以在高温下形成TiO_2，而不是Al_2O_3保护膜的一种强烈趋势为其特征的。为了提高γ铝化物的耐氧化性，有两方面的技术正在得到开拓：合金的开发和改性保护涂层的开发。

三元及较高有序合金的加入可以降低γ合金的氧化速率。特别有利的是少量(1%～4%)钨、铌和钽的三元加入。当结合1%～2% Cr和Mn的四元加入时，就可以使其耐氧化性进一步提高。然而，要强调的是这些少量合金的加入并不能导致连续Al_2O_3膜的形成。相反，还是会形成一种复合、混杂的Al_2O_3/TiO_2膜，但是这种膜的生长速度会降低。

借助于保护涂层，可以使耐氧化性获得进一步的提高。保护铝化钛一般有三种合金涂层方法：MCrAlY(M = Ni、Fe、Co)、铝化以和硅化物/陶瓷。然而，在氧化条件下的铝化钛保护，把三种方法都用上了，经涂层材料的疲劳寿命常常还不如未经涂层的材料的疲劳寿命。

因涂层使铝化钛的疲劳寿命缩短是由于三种主要因素造成的：形成脆性的涂层/基底金属反应区(化学不相容性)、涂层合金的脆性，以及在涂层和基底金属之间的热膨胀系数的差别。能有效地应用于保护镍、铁和钴基的超合金的MCrAlY涂层无法与铝化钛化学相容，并在800℃(1470℉)形成脆性的涂层/基底金属反应区。铝化处理导致在表面生成脆性、并使α-2正交晶系和γ铝化钛两者的热膨胀系数(CTE)不相匹配的$TiAl_3$和$TiAl_2$相。硅化物和陶瓷涂层一般也太脆，且无法适应疲劳的工况条件。

γ合金的理想耐氧化涂层应是基于与γ基底金属有最佳化学和力学相容性的Ti-Al，它能形成连续的Al_2O_3保护层，防止发生氧化和间隙氧/氮脆化，并具有相当的力学性能以适应高周疲劳。目前尚不存在这些性能的理想组合。然而，借助于Ti-Al-Cr系统的涂层合金能达到合理的权衡。这些涂层能采用溅射(Ti-44Al-28Cr在Ti-47Al-2Cr-2Ta上的溅射)、热等静压(Ti-44Al-28Cr和Ti-50Al-20Cr涂层)和低压等离子喷涂的方法得到。图3.14-61所示是用在Ti-48Al-2Cr-2Nb上的Ti-51Al-12Cr涂层的增重氧化遭致破坏的结果。这些试验表明涂层在800℃(1470℉)和1000℃(1830℉)的空气中是能够成功地保护其底金属的。

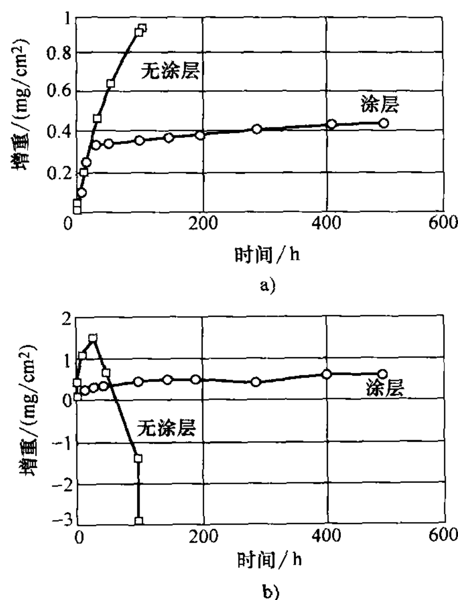


图3.14-61　在空气中，低压等离子喷射的Ti-51Al-12Cr对Ti-48Al-2Cr-2Nbγ-TiAl合金分别在800℃(1470℉)和1000℃(1830℉)温度下遭破坏的氧化行为

a) 800℃(1470℉)　b) 1000℃(1830℉)

其他重要的金属间化合物

Ni_3Si合金。硅化物Ni_3Si是工业用铸造合金Hastelloy D的主要组分，具有独特的能耐硫酸溶液侵蚀能力的耐腐蚀合金(见本篇第8章)。有些基于Ni_3Si的合金如Ni-18.9Si-3.2Cr-0.6Hf-0.15B(原子百分数,%)具有在室温和中温下与镍基超合金IN 718相同的强度，具有作为结构材料应用于化学和石化用途的潜力。

Fe_3Si合金。这是一种名为Sendust(铁硅铝磁合金)、基于Fe_3Si的工业用合金，而且Fe_3Si被开发应用于软磁用途，其典型成分为Fe-9.6Si-5.4Al(质量分数,%)。Sendust由于其优异的磁学性质以及耐磨、耐腐蚀性而作为磁头铁芯材料应用。Sendust的磁学性质已在本章第1节中介绍过(见图3.14-50)。

$MoSi_2$。其引人注意是因为它有很高的电导率和热导率，以及极佳的高温耐氧化性。$MoSi_2$一直在工业上用于在高温炉里的电加热元件，其商业名称为Kanthal，它含有约80% $MoSi_2$和20%玻璃陶瓷化合物。$MoSi_2$的性质已在本章第4节节中介绍过。

NiTi。基于等原子NiTi金属间化合物的Nitinol是一种用于形状记忆合金的主要材料，应用于工业、消费品和医药。有关这种合金的详细内容可见本章第8节。

$SmCo_5$ 合金。用P/M工艺生产的SmCo5合金广泛应用于磁学用途。这种钴-稀土合金的性质和用途在本章的“永磁材料”一节中介绍过。

Nb_3Sn。这是超导装置中的重要组分。这种化合物的性质和用途已在本章第3节节中介绍过。

精选参考文献

- R. Darolia, J.J. Lewandowski, C.T. Liu, P.L. Martin, D.B. Miracle, and M.V. Nathal, Ed., *Structural Intermetallics*, TMS-AIME, 1993.
- T. Grobstein and J. Doychale, Ed., *Oxidation of High-Temperature Intermetallics*, TMS-AIME, 1989.
- High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys, *Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol 39, Material Research Society, 1985.
- High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys II, *Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol 81, Materials Research Society, 1987.
- High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys III, *Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol 133, Materials Research Society, 1989.
- High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys IV, *Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol 213, Materials Research Society, 1991.
- High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys V, *Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol 288, I. Baker, R. Darolia, J.D. Whittenberger, and M.H. Yoo, Ed., Materials Research Society, 1992.
- High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys VI, *Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol 364, J. Horton, I. Baker, S. Hanada, R.D. Noebe, and D.S. Schwartz, Ed., Materials Research Society, 1994.
- C.T. Liu, R.N. Cahn, and S. Sauthoff, Ed., *Ordered Intermetallics—Physical Metallurgy and Mechanical Behavior*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- C.T. Liu, J.O. Stiegler, and F.H. Froes, Ordered Intermetallics, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 911–942.
- Structural Intermetallics, in *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*, J.R. Davis, Ed., ASM International, 1997, p 389–41.
- G. Welsh and P.D. Sesai, Ed., *Oxidation and Corrosion of Intermetallic Alloys*, Purdue Research Foundation, 1996.
- J.H. Westbrook and R.L. Fleisher, Ed., *Intermetallic Compounds*, John Wiley & Sons, 1994.
- S.H. Whang, C.T. Liu, D.P. Pope, and J.O. Stiegler, Ed., *High-Temperature Aluminides and Intermetallics*, TMS-AIME, 1990.

第13节　铍

铍由于具有不寻常的物理和力学性能的组合，故只要其相对较高的成本值得，就能在一些特殊领域获得应用。它有非常低的密度（1.848g/cm^3，或0.067b/in^3）、适中的高熔点（1283℃或2341℉）和高弹性模量（303GPa或44×10^{6}psi）。它还有良好的电导率（40%IACS）和热导率（210W/m·K或121Btu/ft·h·℉）。

非合金铍应用于武器、航天飞机、火箭喷嘴、结构导管、光学元件和精密仪器。比模量，即弹性模量与密度之比高于铝、镁或钛。在遭受惯性或热应力时，高比模量和低热膨胀[11.6μm/(m·K)]能转化成为很好的物理稳定性和低变形，从而使铍在关键的航天飞机零件中十分有用。铍特别优良的尺寸稳定性和反射红外线的能力还能使它非常适用于镜面，无论是用于抛光还是电镀的片基上。铍对于X射线和其他高能电磁辐射都几近于透明，故而能在X射线管和辐射探测装置中作为窗口广泛用作计测薄片。

在工业上，生产应用于电接触、弹簧、点焊电极和非铁合金工具的一些重要时效硬化合金中，铍是一种铜、镍所需要的重要合金元素。它也可以加入铝和镁里，用以细化晶粒和提高耐氧化性。

工艺和产品形式

当铍在熔化和浇铸时，得到的铸件晶粒很粗（>50μm），故很难进行加工，而且通过合金化使其细化也很难如愿。细小的晶粒尺寸主要借助粉末冶金技术生产得到，其细小的晶粒（大小为5~15μm）有赖于粉末的加工。粉末固结是通过真空热压进行的，也可以通过热等静压或冷等静压，再进行真空烧结。

经过固结的铍在室温里仅表现出适中的塑性（≤3%），这是由于其原子结合键中沿c-轴方向的大的共价分量及其六方密排（hcp）的晶体结构，在室温下的这种结构，在其基面与棱面的两个晶体平面上只有一个滑移方向。即使当所含的杂质减少到近10ppm，这种低塑性也无法得以改善。然而铍确实能够在超过200~250℃（392~482℉）的温度下改善其塑性，这时会有更多的晶体变形模式。例如在400℃（750℉），它的伸长率高达50%　。当到温度1270℃（2318℉）时，铍转变为体心立方（bcc）相，仅低于其熔点13℃。

铍是通过平轧、挤压成为型材的，并且能在高温下锻造。一般采用温加工，一般手册建议热变形加工的温度范围为800~1100℃（1470至2110℉）。工业用铍可以使用管型材和厚度范围从0.013~15.2mm（0.0005~0.6in）的箔材、薄板和厚板材。在725~900℃（1340~1650℉）下，进行再结晶退火。就像其他的六方密排晶体的金属一样，锻造的铍由于其结晶学织构和晶粒形态而显示出各向异性的力学性能。制造粉末利用传统球磨技术可生产得到扁平的、有晶体取向的粉末颗粒，它们在初始的压制阶段里，自然形

成一种结晶学织构。包括冲击碾磨或雾化方法在内的较新粉末制备技术能生产更为等轴化的产品，避免因球磨而产生取向性扁平粉末，并减少在初始固结过程中产生的晶体学织构数量。尽管如此，还是要注意尽量用细小的晶粒制造铍，并尽可能使其成为随机的结晶取向。横轧薄板的室温拉伸性能为345～414MPa(50～60ksi)的屈服强度、483～621MPa(70～90ksi)的抗拉强度以及10%～40%的伸长率。抗拉强度和屈服强度看上去都遵循屈服强度与晶粒大小之间的Hall-Petch关系。

当使用碳化物刀具切削时，铍表现出铸铁的切削特性。一般它可以钎焊、粘附连接，并能精心地进行弧焊?

铍的牌号和性能

铍的工业用牌号是用杂质和BeO含量进行区分的。事实上，其金属通常都含有0.7%～4.25%的BeO，这是无法避免的，而且随着在固化过程中铍粉末细小度的提高而增加。氧气在其中的溶解度极低，并容易形成留在晶界上的氧化物颗粒，低于1.2% BeO的这种颗粒将有助于控制晶粒的生长而无碍于塑性。表3.14-57所列的是工业用铍的化学成分。

表3.14-57 工业用牌号铍的化学成分

牌号	铍的成分(%)		最高杂质含量(质量分数,%)					
	Be(最低)	BeO(最高)	Al	C	Fe	Mg	Si	其他，每一种
结构用牌号								
S-65B	99.0	0.7	600	1000	800	600	600	400
S-200F和S-200FH	98.5	1.5	1000	1500	1300	800	600	400
仪器用牌号								
I-70A	99.0	0.7	700	700	1000	700	700	400
O-50	99.0	0.5	700	700	1000	700	700	400
I-220B	98.0	2.2	1000	1500	1500	800	800	400
I-400B	94.0	4.25最低	1600	2500	2500	800	800	400

结构用牌号。(代号中用"S"表示)其中S-65B含最低99.0% Be和0.7% BeO，它在室温下具有最大的塑性、207MPa(30ksi)的屈服强度、290MPa(42ksi)的抗拉强度和3%的最小伸长率。牌号S-200F含最低98.5% Be和1.5% BeO，其强度高一些而塑性稍差，在室温下：240MPa(35ksi)的屈服强度、325MPa(47ksi)的抗拉强度和2%的伸长率。这种牌号适用强度和弹性模量的温度可高达600～650℃(1110～1200℉)，此时有100MPa(15ksi)的屈服强度、130MPa(19ksi)的抗拉强度和10%的伸长率。

仪表和光学仪器用牌号。仪表用代号中I表示，如I-220B和I-400A应用于惯性制导系统，要求高几何精度和抗百万分之一数量级的塑性变形能力(显微屈服强度)。除这些牌号之外，I-70的开发用于卫星图像系统的光学元件，光学牌号O-50开发用于红外光学仪器。表3.14-57列出仪表/光学仪器牌号的成分。

铍合金。铍由于活性过强而不能作为合金元素使用，它能与大部分的普通金属发生反应生成稳定的化合物。有关铍基合金的研究都是针对铍-铝系统而进行的。一种已经获得一定商业应用成果的合金就是Lockalloy(62Be38Al)。这种合金的密度为2.1g/cm^3(0.076lb/in^3)且其弹性模量为200GPa(29×10^6psi)，它应用于航空电子学(热控制)系统、汽车零件(赛车里的制动钳)以及飞机和卫星的结构件。与非合金铍相比，铍-铝合金具有较好的塑性(5%～7%的伸长率)、屈服强度(275～310MPa或40～45ksi)和抗拉强度(380MPa或55ksi)。

耐腐蚀性。铍能形成薄的氧化物(BeO)保护层，在室温下它对大气有很好的耐腐蚀性，并且对高达300℃(570℉)的纯净水也有极好的耐腐蚀性。不过其耐腐蚀性为杂质所削弱。特别是碳化物和氯化物的存在，会造成在室温下与潮湿空气的反应。超过760℃(1400℉)，铍会与氧气和氮气发生反应，但在任何温度中都一点也不与氢气反应。它在室温下会遭受许多普通稀酸的侵蚀。它还能通过阳极化或铬酸盐的涂层提高其防腐蚀性。

健康和安全的考虑。与处置铍相关的一个主要关心的问题就是，当吸入过量的铍粉末或粉尘时对肺部造成的危害。个别敏感的人处于含铍的空气中就会患

上铍肺疾病。用户应该遵守联邦条例(美国)适用于铍的第 29 篇 1910 部分的强制性安全和健康标准。

精选参考文献

- J.J. Mueller and D.R. Adolphson, Corrosion of Beryllium, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, ASM International, 1987, p 808–812.
- A.J. Stonehouse and J.M. Marder, Beryllium, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *ASM Handbook*, ASM International, 1990, p 683–687.

第 14 节　极高密度的金属

Kenneth H. Eckelmeyer, Sandia 国家实验室: Steven G. Caldwell, Teledyne 先进材料公司

极高密度的金属用于如砝码、辐射防护屏以及穿甲、动能弹头的一些用途上。虽然铅常常被认为是一种原型的高密度金属，但是它的软度和低熔点使其在许多用途上不适用。此外，铅的密度比另一些金属还低很多，如表 3. 14-58 所示。在这些密度较高的替代金属当中，只有铀、钨和钽在大多数的工业应用中有实用价值。在本手册的“耐熔金属和合金”一节中已经讨论过钽。本节将介绍最为常用的极高密度材料：贫化铀和钨合金。

表 3. 14-58　密度超过铅 40%的金属

金　属	密度/(g/cm³)
钽	16. 6
钚	19. 0 ~ 19. 7
铀	19. 1
钨	19. 3
贵重金属	19. 3 ~ 19. 7

注：铅的密度为 11. 35g/cm³。

贫化铀和铀合金

冶金。天然形成的铀在地壳中占有 0. 0004%，它比银多出 40 倍、比金多出 800 倍。天然铀含有大约 0. 7%裂变 U^{235}和 99. 3% U^{238}。在铀矿的化学处理过程中进行同位素分离；以此富集 UF_6，它含有的 U^{235}大于0. 7%并供核应用；还有贫化 UF_6，其一般为99. 8% U^{238}并可用于要求密度非常高的非核用途。

铀金属是用氢将 UF_6还原成 UF_4而生产的，然后在高温下让其与镁或钙发生反应生成铀块。这些粒子用真空感应熔化，在此过程中加入合金元素并浇铸成所要求的形状或锭块以供后续的金属加工使用。随后对锭块通过热变形加工工艺(如轧制、锻造或挤制)进行热成形，有时还需二次加温或冷轧或模锻、铸造或锻造铀零件，以展现其典型的金属强度和塑性。它们可以用传统方法进行切削加工和用惰性气氛保护工艺进行焊接。它们非常容易被氧化和腐蚀，故常用保护涂层将环境引起的损害降到最小。

非合金化铀化有三种多晶体型式：高于 771℃(1420℉)的 γ 相(体心立方或 bcc 的)、介于 665 ~ 771℃(1229 ~ 1420℉)的 β 相(四方晶型的)以及低于665℃(1229℉)的 α 相(正交晶型的)。高温的 γ 相非常软并具有塑性，当其产生塑性变形时会发生动态再结晶。然而通常都要避免在 γ 范围里进行金属加工，因为快速氧化会导致表面质量变差。作为中间温度的 β 相很脆，并不适宜进行金属加工工艺。在高于200℃(390℉)的温度下，α 相主要通过滑移而变形，但是当温度降低到该温度以下时形成孪晶的量随之增加。低流变应力、高塑性以及氧化速率减小的结合会形成对于初始热变形加工是很理想的高-α 范围。高于大约 550℃(1020℉)会发生动态再结晶，但是如果当锭块冷却到较低的温度还继续变形时，材料会发生冷作硬化。低于约 200℃(390℉)时，材料变得较为刚性，但是如果能在约 600℃(1110℉)的温度下进行周期性再结晶退火，则可以在低至室温的温度下进行二次轧制和模压。

非合金化铀的力学性能在很大程度上随工艺历程的改变而不同，如表 3. 14-59 所示。铸造铀一般会显示非常大的晶粒(~1mm 或以上)。由此常导致不均匀的局部化变形并造成拉伸塑性低下和变化。在 β 相区的热处理常用于细化 α 晶粒组织和提高塑性。如果在真空中进行热处理，高 α 或 β 热处理也能将材料中的脆化氢去除，从而进一步提高其塑性。经 α 加工或再结晶的铀含有细得多的晶粒，并展现相当高的塑性。经温终锻的材料获得最高塑性。α 铀在室温附近表现出从塑性到脆性的过渡。即使存在非常少量的溶解氢(百万分之几)，也将提高从塑性到脆性的过渡温度。温加工使得材料能容纳较多的氢(也许因其提供了位错的氢穴)，从而阻碍了从塑性到脆性的过渡并提高了它的室温塑性。

工艺和性能。铀在使用时，常要提高其防腐蚀性和力学性能。合金元素如钛、铌、钼、锆和钒在高温相中特别可溶，在中等温度的 β 相中则很不可溶，在低温 α 相中基本上是不可溶的。钛主要用于提高强度。铌能最大限度地提高耐氧化和耐腐蚀性。少量的钒可用于细化铸件中的晶粒。

铀合金一般都是用与非合金化铀相同的方法进行真空感应熔化、铸造和制造的。两者的主要差别是合

表3.14-59　铀和铀合金的性能和应用

合　金	密度/(g/cm³)	工　艺	硬度	屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)	耐腐蚀性	所应用的用途要求	备　注
				MPa	ksi	MPa	ksi				
非合金	19.1	铸造	93HRB	205	30	450	65	6	差	复杂型材，强度和塑性最小	—
	19.1	铸造，b-淬火①，H-脱气②	93HRB	295	45	700	100	22	差	复杂型材，塑性有所提高	—
	19.1	α-轧制③	94HRB	270	40	575	85	12	差	薄板、圆棒等，强度和塑性最小	—
	19.1	α-轧制③，H-脱气②	94HRB	270	40	720	105	31	差	薄板、圆棒等，塑性有所提高	—
	19.1	温轧④	94HRB	220	30	750	110	49	差	薄板、圆棒等，塑性最大	—
U-2Mo	18.6	γ-退火⑤		415	60	830	120	10	差	强度有所提高	—
U-0.75Ti	18.6	γ-淬火⑥，时效380℃(715℉)⑦	42HRC	965	140	1656	225	19	好	强度和塑性两者均高	截面厚度有限，高残余应力，对氢和潮湿敏感
	18.6	γ-淬火⑥，时效450℃(840℉)⑦	52HRC	1215	175	1660	240	<2	好	硬度最高	高残余应力，易于延缓开裂
U-6Nb	17.3	γ-淬火⑥⑧	82HRB	160	25	825	120	31	佳	耐腐蚀，高塑性	正确减小截面厚度的限度
U-10Mo	16.4	γ-淬火⑥	28HRC	900	130	930	135	9	佳	耐腐蚀，高强度	最小的截面厚度的限度，易于发生应力腐蚀

①720℃(1330℉)淬火，再加热至600℃(1110℉)，缓慢冷却，这种程序常进行两次。　②在高α-区真空热处理，时间取决于截面厚度。　③在熔盐中，加热至640℃(1185℉)，然后轧制。在550℃(1020℉)以上发生动态再结晶，当轧制温度降至550℃(1020℉)以下时，硬度和强度都会提高。　④若干次的~300℃(570℉)轧制加上600℃(1110℉)的真空退火，最后550℃(1010℉)退火。　⑤800℃(1470℉)热处理1h(若要求从厚截面内去氢,则时间延长)，缓慢冷却。　⑥800℃(1470℉)真空热处理1h(若要求从厚截面内去氢,则时间延长)，水或油(速度由截面厚度确定)淬火。　⑦真空或干燥氩气中时效5h。　⑧800℃(1470℉)真空热处理，其临界淬火速度大大低于U-0.75Ti所要求的速度，通常对于U-10Mo，空气冷却就足够了，但是对于U-6Nb则不够。

金中含有相当数量的高熔点铌，而这常需要用真空电弧熔化。某些高合金材料如U-6Nb，也必须在γ温度范围里加工。

实际上，所有铀都在γ温度范围(约800~850℃或1470~1560℉)里进行真空固溶处理，溶解合金元素并去除氢。最终形成的显微组织和性能受从固溶处理温度的冷却速度的影响是很大的。

缓慢冷却的合金会形成双相显微组织，而合金元素就存在于其第二相中。这种第二相就是典型的金属间化合物或合金-稳定化的各种不同γ相。第二相通过与在铁中加入碳以增加Fe_3C的数量达到强化的同样方式，使强度提高而塑性降低。因为合金添加并不在铀的固溶中进行，故它们对于耐氧化和耐腐蚀性并没有什么益处。

当合金被淬火时平衡相的转变往往受到阻碍，从而形成有合金元素过饱和并在很大范围形成有用性能

的各种非平衡显微组织。有三种作用尤为重要。首先，由于合金元素留在铀的固溶体里，因而使淬火材料的耐腐蚀和耐氧化性得到提高。其次，合金元素还使固溶得以强化。最后，由于这些固溶体都是过饱和的，所以它们能通过后续的较低温度热处理而得到时效硬化。图3.14-62所示是经淬火的合金显微组织及其性能如何随合金含量的增加而改变。

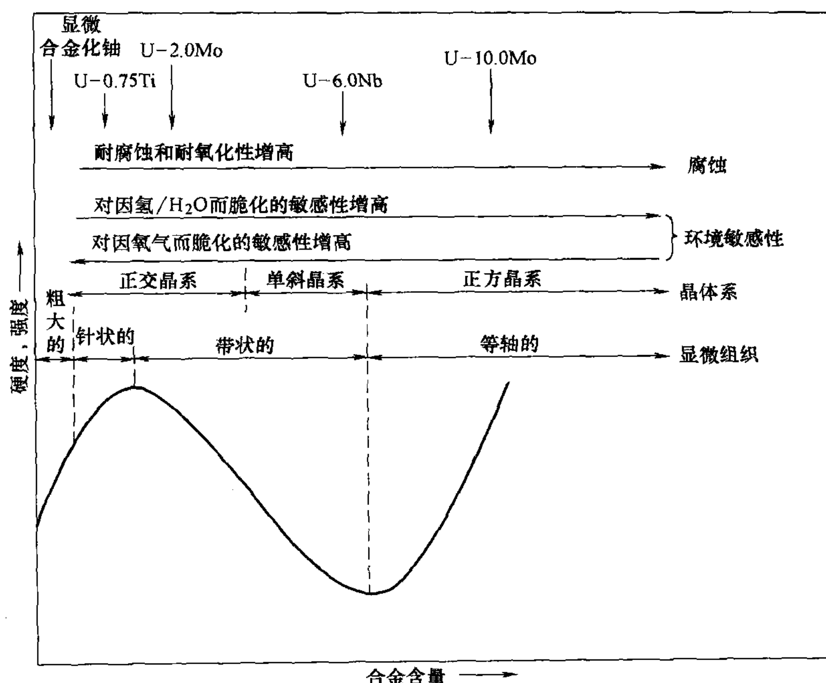


图3.14-62 淬火铀合金的成分对显微组织和性能的影响

非常低含量的合金（<0.3%合金添加量）一般都要经历相变的平衡过程，但是合金元素倾向于延缓这些扩散转变，并能使其受到遏制以降低温度。所以能以此减小铸件中α晶粒的大小，特别利用少量钒的加入。U-0.2V铸件在约516℃（961℉）的温度下实现从β到α的等温转变，因此所显示的晶粒大小比非合金化铀铸件的小10~20倍。

在较高含量的合金中（合金含量从0.5%至百分之几），相变的平衡过程都能通过淬火完全免除，然后γ相经过无扩散的马氏体转变成为α相的各种不同的过饱和变型。在非常高含量的铀合金（接近10%的合金添加量）中，马氏体起始温度（Ms）低于室温，故高温γ相的亚稳态变型得以保持。

为避免扩散转变并获得这些过饱和组织所需要的临界冷却速度，是以一种复杂的方式随合金含量的不同而变化。然而一般来说，像U-0.75Ti的低合金要求快速淬火。这就限制了它们可以采用的截面厚度。更高的合金如U-6Nb和U-10Mo要求烈度很低的淬火，故可以采用较大的截面。

在离子氯化物和其他一些介质中，铀合金会对介质开裂产生敏感。低合金还对氢气容易产生敏感，这是由于大气潮湿在表面分解所致。高合金对于大气氧较为敏感。即使在这些相对较为缓和的环境中，由复杂形状零件淬火形成的拉伸表面残余应力也足以造成开裂。这种应力的幅度受限于淬火材料的屈服强度。因此高强度合金如U-0.75Ti和U-10Mo可能对于迟延开裂最具有敏感性，而低强度合金如U-6Nb相对不受影响。

一般耐氧化和耐腐蚀性随固溶体中的合金含量的增加而提高。因此，像U-6Nb和U-10Mo常应用于要求有良好耐腐蚀性的用途。

凡是先经过淬火的材料都适合于后续时效。时效硬化发生在高达约450℃（840℉）的温度里。由此明显提高强度却使塑性降低。时效硬化的U-0.75Ti是要求高强度的最常用合金，但是其他合金也能用这种方法进行强化。时效硬化的材料还能保持其已增强的耐腐蚀性，因为大部分的合金添加还保留在固溶体里。在前期淬火期间产生的残余应力将随时效硬化的进程逐渐消除。

由于过饱和固溶体在超过450℃（840℉）温度下的胞状分解而产生过度时效。由此导致强度有相当的

下降。在一些情况里塑性有所提高，但是在另一些情况里(明显的是U-0.75Ti)就不是这样，因为有半连续的、脆性金属间化合物薄膜的形成。耐腐蚀性也会急剧下降，因为在固溶体中不再保留合金成分了。

切削、焊接和防腐蚀保护。铀和铀合金可以用传统的方法进行切削加工，其切削差不多像不锈钢一样。非常软的材料如非合金化铀和淬火U-6Nb往往有粘性。时效材料如U-0.75Ti，由于其高硬度也会有些困难。合金的切削是最容易的，它们能经缓慢冷却或过度时效而产生相对较软的双相显微组织。

铀和铀合金本来就适合用惰性气氛工艺焊接，但是在某些成分范围里，会由于亚临界冷却和残余应力而造成一些困难。U-0.75Ti的难以焊接在于因其焊接冷却速度所造成的从γ相开始的亚临界冷却，并最终造成脆性显微组织。U-6Nb易于焊接是因为其较少的淬火敏感性以及它的低淬火强度防止了高焊接诱发残余应力的形成。U-10Mo没有焊接速度敏感性的问题，但是其较高的强度导致较高残余应力的产生，也就增加了其对延迟发生开裂的敏感性。

铀和低合金铀对于氧化和腐蚀都有高度敏感性。保护涂层如电镀镍或离子镀铝，都常应用于使这种环境的影响降到最小。较高的合金如U-6Nb和U-10Mo具有较高耐氧化和耐腐蚀性，故通常无需涂层。

设计依据和应用。在贫化铀和铀合金的应用中，必须考虑若干设计上的限制：对氧化和腐蚀的敏感性，相对低的韧性(尤其在低温下)以及涉及加工和应用的一些健康和安全方面的考虑。

非合金化铀主要应用于辐射屏蔽、砝码和其他对强度要求极小的用途。镍电镀或铝的离子镀都是为了在必要时提供腐蚀保护。U-0.75Ti常选用于要求高强度和中等韧性的用途上，如动能弹头。淬火速度敏感性限制了这种合金在直径超过30或40mm(1.2或1.6in)时的使用。在要求高塑性和特别耐氧化和腐蚀的用途中，U-6Nb是最为常用的。

健康与安全的考虑。在加工贫化铀时，几个有关健康和安全的问题必须予以考虑。首先，其材料细研会引发自燃，故必须使用大量的切削液，而且切屑、锯末和磨屑必须随时从刀具上清除，并让其沉浸在水或油中。其次，如果材料被吸入或食入，将会造成重金属中毒。贫化铀基本上具有像其他重金属如铅一样的毒性。避免采用会产生空气中悬浮微粒的干磨，定期清洁加工场所(尤其是在产生锯末或磨屑的地方或在热变形加工过程中有氧化皮剥落下来的时候)以及在铀的加工区域采取有效的个人保健措施等，都是为了尽量防止其吸入和食入。最后贫化铀是具有轻度放射性的。一般认为，这种低度放射性构成的危害要比化学毒性轻一些。在贫化铀周围工作和正常处理这种材料时不会造成超过目前剂量标准的辐射。尽管如此还是要避免不必要的密切接触(例如将贫化铀放在口袋里携带等)。

有时，公众在这类法定健康和安全问题上的夸大认识往往要超过技术上的评判。公众对于贫化铀放射性的这种关切使得其应用环境变得日益严峻，并且不得不慎重考虑用其他材料如钨重合金取而代之。

钨和钨重合金

冶炼和应用。往往被人们认为是不太寻常的金属钨构成地壳的大约0.0069%，几乎与铜一样多。粗矿石——白钨矿和钨酸盐——一般采用浮选法磨粉和富集。富集后的精矿在随后的几步工序里进行加热浸提和反应，由此形成仲钨酸铵(APT)。将其煅烧成为蓝氧化物($WO_{~2.8}$)，然后通过氢还原将其还原成金属钨。

由于钨的极高熔点(3410℃或6170℉)，事实上所有批量型材都是通过粉末冶金进行工业生产的。对于生产钨的圆棒毛坯，金属粉末一般用150~600MPa(20~85ksi)的压力压制成长形坯条。接着是轻度的H_2预烧结，将生坯条夹持着进入水冷电极，在H_2中直接烧结。一般要求初始横截面电流超过1350 A/cm²，以此获得适合的电阻热。即使超过3000℃(5430℉)也达不到完全密实化，而这可以通过后续的形变热处理(热模压和再退火)予以实现，在此过程中坯料被压缩到所要求的直径。最后的变形工序一般通过热拉以达到所需要的表面粗糙度。

钨具有一种bcc的晶体结构，并且是已知仅有的弹性各向同性的金属。钨的弹性模量约为410GPa(60psi×106)，在所有金属中居最高之列。整体钨在200~500℃(390至930℉)的范围里表现一种从塑性到脆性的过度，温度取决于其工艺过程。因此，它必须用温加工来避免开裂。经重加工的钨形成一种颇具塑性的纤维形显微组织，它们能紧密弯曲成为圆弧而不会断裂。这些小直径细丝的强度可以接近4.1GPa(590ksi)。

如果将重度变形的钨在大约1200℃(2190℉)或更高的温度里放置足够长的时间，就会在晶界上发生再结晶并使溶解杂质发生偏析，导致脆性特性的回复。这也是一般认为钨是不可焊的主要原因，即会在熔化和热效应区发生开裂。当有必要将钨与其自身或其他金属相连接时，应该考虑采用机械紧固。

对于特殊应用，还有许多其他替代技术可以用于

钨批量型材的成形加工：电弧熔化和铸造（有时采用熔渣方法）、电子束熔化、化学气相沉积和等离子喷涂。电弧浇铸常用于纯度要求极高的元件。等离子喷涂目前应用于轴对称薄壁零件的制造。

钨使材料设计人员获得一种具有最高密度的、无任何放射性的非贵重金属。极高的熔点使其被选用于白炽灯的灯丝，高电流的电接触以及电弧灯和惰性气体钨极电弧焊的电极（也称为气体保护钨极电弧焊，或 GTAW）。除作为纯钨应用于所有上述这些的用途外，一般还能通过掺杂、合金或复合等形式进一步实现其性能优化。

灯丝是用铝钾硅酸盐掺杂的“AKS”。由此促成在晶界上生成钾泡，从而形成晶粒间的相互连接并延长灯丝的使用寿命。需要在高振动和冲击用途中应用的灯丝含有（质量分数）1% 的弥散的二氧化钍，使其成为晶界上的钉住点并增强其高温强度。

电触头一般都采用通过渗透而成的钨-铜或钨-银复合材料制造的。W-10Cu 复合材料具有一种与主半导体封装材料相匹配的极佳热膨胀系数（6.5×10^{-6}/K），并成为一种高散热的散热片材料而获得广泛应用。其低膨胀性源自于钨相，而热导率则来自铜相。

高亮度、直流电弧灯一般使用至少含有（质量分数）1% 的氧化钍的钨阳极和阴极，以此增强热离子发射和将再结晶减小到最低限度。用于 GTAW 的电极也同样含有稀土氧化物以获得较大的发射，从而提高其电弧稳定性并延长寿命。

钨重合金工艺和性能。钨重合金（WHA）在惯性质量和密度有关的应用方面如放射性屏蔽具有许多超过纯金属的优点。这些合金一般在由 90%～98% W 构成的基体中含有镍、铁，和/或钴。而其密度要比纯钨稍小一些，WHA 能较为容易地在 1470～1580℃（2680～2875℉）——远低于纯钨所要求的温度下通过在 H_2 中的液相烧结（LPS）制造成大型、全密度的零件。除此之外，实际上所有的 WHA 都易于切削加工，可以用普通的金属切削刀具和技术加工出复杂的几何形状。

钨重合金一般都有塑性，但由于其主相的 bcc 晶体结构，它们容易遭受氢脆化。因此，借助真空退火或其他方法可以提高其准静态的塑性。进一步的再固溶化处理和水淬能在较大的分布范围里固定间隙杂质，减小由偏析引起的脆化，从而使断裂韧度得到有效的提高。

当可以采用热等静压和快速固化技术时，固态烧结或液相烧结（LPS）是把 WHA 固化成为全密度的最普通方法。前一种工艺对于要求微小的热变形和极小的力学性能的零件来说是很理想的。而液相烧结是一种实现全密度并提高力学性能的最佳方法，但是由于在 LPS 过程中，毛细管和重力的作用而造成较大的变形（“坍塌”）。LPS 工艺会造就一种由近似纯钨的球体（其大小约为 40～60μm）在由过渡金属加上溶解钨所组成的奥氏体粘结相中所构成的显微组织，如图 3.14-63 所示。这种显微组织由于少有带棱角的晶粒、较低的钨-钨接触性以及亚稳态钨在固溶粘结剂中所占的较高百分比，而具有较高的力学性能。钨-钨间的接触和界面脆化是制约 WHA 力学性能的主要因素。

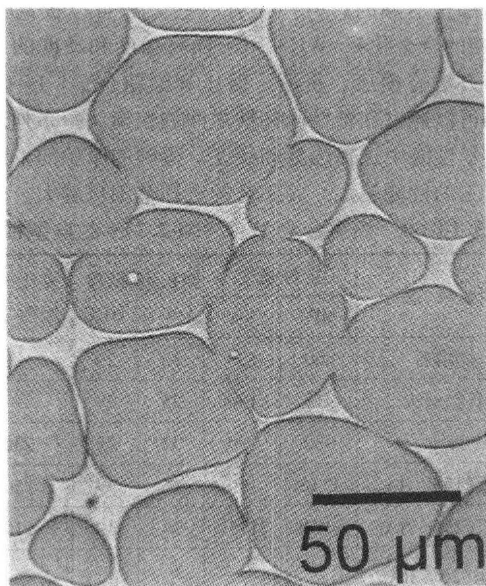


图 3.14-63　通过液相烧结的 W-7Ni-3Fe 重合金的典型纤维组织

W-Ni-Cu 系统是开发的第一种合金系统，并且仍然偶尔应用于那些只能表现出极小铁磁特征的零件上。迄今工业用最重要的合金系统是三元合金 W-Ni-Fe。这个家族的合金现已应用于所有 WHA 的用途上，它们具有比早期钨-镍-铜合金更高的力学性能。粘合剂的成分是很重要的，它会严重影响力学性能，甚至决定将需要进行何种烧结后的热处理。镍-铁比例范围从 2%～4% 是最常见的，因为在此范围里的材料都能安全地进行加工，而无需担心金属间化合物在粘合剂中析出并由此引起脆化。在低于大约 1.2 镍-铁比例的情况下，有形成 Fe_7W_6（一种 μ-相）的风险，这取决于所用的时间-温度曲线。一旦形成，其热化学稳定性都能防止它在所有实际加工温度里的再固溶。

镍-铁比超过～5%，一般会导致 Ni_4W 在正常的

烧结和冷却的循环中析出。不像富铁金属间化合物，这种富镍化合物易于在约1150℃(2100℉)的温度里再固溶化，并使WHA有较高的镍-铁比，以利其加工。镍-铁比介于从6到大约15的钨重合金具有明显较高的性能，但还是需要进行真空退火和再固溶化/淬火的两种处理。所有的WHA都能从再固溶化/淬火处理中获益，即使为控制金属间化合物，其成分也不要求进行再固溶化/淬火处理，因为这种处理可减小会引起界面脆化的如碳、硫和磷的间隙原子发生偏析的程度，从而增强合金的韧性。

对于某些用途，材料不经过变形加工，其强度和硬度都是不够的。另外还有一些方法可以提高强度（如钼的合金化），WHA用于提高强度和硬度的最普通的方法有模压、挤压、锻压和镦粗(表3.14-60)。于是可以通过在塑性和韧性之间的权衡从一系列连续的力学性能中选择强度和硬度。得到的原始的未经变形加工的性能越大，其工艺的选择范围也越大。

表3.14-60　钨重合金W-4.9Ni-2.1Fe的典型性能

状　态	抗拉强度		伸长率	硬度	夏比冲击
	MPa	ksi	(%)	HRC	吸收功/J
烧结后	860	125	15	29	—
真空退火	910	130	25	29	—
淬火	930	135	32	29	230
模压(15% RA)	1115	160	16	39	150
模压(25% RA)	1200	175	14	40	110
模压(25% RA)+500℃(930℉)时效1h	1400	205	7	44	80

注：RA，断面减小。

为使重合金能满足较高力学性能的需要(主要出自枪击和动能弹头的要求)，20世纪80年代开发了W-Ni-Co族的合金。尽管需要烧结后的热处理，它们还是能获得优异的力学性能(表3.14-61)。

表3.14-61　未经加工的钨重合金的性能比较

合金	抗拉强度		伸长率	硬度	夏比冲击
	MPa	ksi	(%)	HRC	吸收功/J
W-6.3Ni-2.7Fe	940	135	35	29	300
W-6Ni-3Co	960	140	40	31	470+

WHA的设计依据和应用。WHA显微组织的复合特性包含多种内涵。也许缺口敏感性的力学性能方面的考虑是第一位的。作为理想的情况，实际设计是不应该含有缺口、螺纹以及圆弧半径小于约0.5mm(0.2in)的凹角，否则其应力集中会降低强度。虽然WHA对腐蚀并不特别敏感，但尽管如此，如果有适合的电解液的存在，处于钨相和具有电化学差异的奥氏体粘合剂相之间的局部电池作用还是会发生腐蚀。强碱溶液易于侵蚀钨相。复合结构的机械失配也会直接影响金属加工工序的成形性极限。然而，弹性失配确实有助于振动的减缓——对于高刚性、低震颤的WHA镗杆和刀具夹头来说，是一个至关重要的因素。

由于钨相与粘结剂在化学成分、性质和熔点上差别，WHA的焊接并不容易，故应尽可能采用机械紧固的连接。将WHA硬钎焊到不同类型的金属上是可能的，但是由于局部形成金属间化合物的脆化而使其接头处的强度一般较低。

钨重合金日益广泛地应用于一大批产品上，包括种类繁多的终端应用，如辐射准直和屏蔽、飞机和高尔夫杆的配重、无铅水鸟弹、高刚性的(模量为~380GPa或55psi×10^6)镗杆和刀具、动能弹头、陀螺零件以及磁盘机的缓冲器。对于综合要求良好切削性、高密度、优异热稳定性、中等成本和/或不存在为使用铅和贫化铀基体材料而需考虑其毒性问题的情况，这种合金是其理想的选择。由于在规划新产品及其应用时，环境和安全方面的考虑甚至要成为更为重要的考虑因素，如镍和钴的一些轻微毒性金属在WHA的总质量中仅占有很小的比例，这一事实也就成为其选用动机。

精选参考文献

- J.A. Aris, Metallography of Uranium and Uranium Alloys, *Machining*, Vol 16, *Metals Handbook*, 9th ed., ASM International, 1989, p 874.
- J.J. Burke et al., Ed., *Physical Metallurgy of Uranium Alloys*, Brook Hill, 1976.
- S.G. Caldwell, Variation of Ni/Fe Ratio in W-Ni-Fe Heavy Alloys: A Current Perspective, *Tungsten and Tungsten Alloys—1992*, Metal Powder Industries Federation, 1993, p 89.
- K.H. Eckelmeyer, Metallography of Uranium and Uranium Alloys, *Metallography and Microstructures*, Vol 9, *Metals Handbook*, 9th ed., American Society for Metals, 1985, p 476.
- K.H. Eckelmeyer, Uranium and Uranium Alloys, *Properties and Selection: Non-Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol 2, *Metals Handbook*, 10th ed., ASM International, 1991, p 670.
- R.M. German, L.L. Bourguinon, and B.H. Rabin, Microstructural Limitations of High Tungsten Content Heavy Alloys, *J. Met.*, Vol 37 (No. 8), 1985, p 36.

- A.N. Holden, *Physical Metallurgy of Uranium*, Addison-Wesley, 1958.
- *Metallurgical Technology of Uranium and Uranium Alloys*, Vol 1-3, American Society for Metals, 1982.
- L.J. Weirick, Corrosion of Uranium and Uranium Alloys, *Corrosion*, Vol 13, *Metals Handbook*, 9th ed., ASM International, 1987, p 813.
- S.W.H. Yih and C.T. Wang, *Tungsten*, Plenum Press, 1979.

第15节　用于滑动轴承的材料

滑动轴承(普通轴承)是一种旨在将载荷或作用力传递到相对于轴承转动的一根轴上的机械元件。轴颈轴承是圆柱形(全圆柱体或部分圆柱体)的，而且应用于当载荷或作用力基本上是径向的(即垂直于轴的轴线方向)情况。推力轴承是环形的(全环块或部分环块)，而且应用于当载荷或作用力平行于轴的轴线方向时。径向和轴向两种载荷都要用带法兰盘的轴承进行调整，这是一种由一个或两个整体形的推力轴承表面构成的轴颈轴承。轴颈或止推轴肩表面相对轴承表面的滑动是滑动轴承的特征。在许多的用途中，滑动轴承具有超过滚动轴承的优势——例如较低的成本、较小的空间要求、有边界润滑剂运行的能力、耐腐蚀和承受高载比的能力。

分类

滑动轴承一般按它们的用途进行分类，如：

- 连杆轴承；
- 主轴承；
- 凸轮轴轴承或轴瓦；
- 电动机轴轴瓦；
- 副轴止推垫圈。

“轴承”和“轴瓦”互换使用，但两者在其功能和机器中所处部位确实有明显的不同。

有关其尺寸，滑动轴承常分为薄壁(薄于~5mm或0.2in)或重型壁厚。一般来说，直径>150mm(>6in)被认为属于重型壁厚类。按形状可进一步分成半圆、全圆、法兰型或垫圈。汽车工程师学会(SAE)标准将薄壁轴承分为三组：轴套型半轴承、剖分式轴瓦和止推垫圈。

滑动轴承往往也按照材料构成进行分类，如单金属(固体)、双金属(两层)或三金属(三层)轴承。这些名字都是指其所用的主要功能层的数量。构成这些类型的每一种都有广泛的工业应用和各种不同的用途。利用两、三个分隔层的方法形成适当性能组合，这是用单一金属轴承所无法实现的。

设计和选择

磨损的损坏机制

从轴承材料设计和选择的观点来看，必须考虑一些或全部以下的磨损损坏机制：

- 表面疲劳磨损；
- 磨料磨损；
- 粘着磨损；
- 冲蚀磨损；
- 腐蚀。

磨损损坏的隐患与运行系统的一些特征之间的相互作用有着密切的联系。这些特性包括：

- 轴承载荷的幅度；
- 载荷的性质(周期的或不变的、单向的或反向的)；
- 速度；
- 润滑剂和润滑系统特征；
- 润滑剂清洁度和过滤；
- 运行温度；
- 滑动表面(轴)的材料和表面粗糙度；
- 同轴度和刚度；
- 期望寿命。

更详细的内容可以参阅《ASM手册》第11卷失效分析和预防中叙述滑动轴承的有关章节和第18卷摩擦、润滑和磨损技术。

轴承材料的性能

表面和整体性能。普通轴承必须满足的工作条件以及这些条件所具有的变化范围，导致有两方面的轴承材料性能必须考虑：表面性能(与轴承的表面及与之紧密连接的亚表层相关的性能)和整体性能。

材料性能的传统工程定义不足以很好地表述作为滑动轴承材料所要求的各种独特性能。虽然有关这些性能的专用术语、检测或试验尚无能被普遍接受的定义系统，但是它们还是可以按照以下特征进行定义和研究。

- 相容性：一种轴承材料当与指定材料匹配时，它们的抗焊死和抗拉伤的能力。
- 适应性：一种轴承材料对于轻度不同轴度的容忍和补偿，并与轴颈或轴承座孔的形状变异相适应的能力。
- 嵌入性：一种材料被尘土或外来颗粒镶嵌的能力，以防止因此在轴颈或轴承表面发生胶合和磨损。
- 承载能力：一种材料为正常工作而不发生过度的摩擦、磨损和疲劳损坏所能承受的最大单位表面积上

的压力。

- 疲劳强度：一种材料在低于弹性极限的、周期性载荷的作用下，能够正常运行而不发生开裂和表面点蚀的能力。
- 耐腐蚀性：一种材料承受由允许使用的或被污染的润滑油造成的化学侵蚀的能力。
- 硬度：阻止在高单位压缩载荷的作用下发生塑性流动的能力，用压痕硬度试验的传统方法进行测试。
- 强度：阻止在载荷的作用下发生弹性和塑性变形的能力，用压缩、剪切和拉伸试验的传统方法进行测试。

表3.14-62所列的是轴承材料的性能与磨损失效机制间的某些较为重要的关系。相容性可以认为是一种纯表面特征。而适应性和嵌入性涉及表面和与之相连的亚表层，并且与作为整体性能的强度和硬度有很大的关系。其他的特性主要与整体特性有关。

表3.14-62　轴承材料性能对磨损失效机制的影响

轴承材料性能	与之相对的失效机制	原　因
相容性	粘着磨损	微凸体的接触，表面粗糙，不良油膜
适应性	粘着磨损，表面疲劳磨损	不同轴度，边缘载荷，装配错误，几何误差
嵌入性	磨料磨损，粘着磨损	油中的尘粒，拉伤
疲劳强度	表面疲劳磨损	动态超载，局部过载(如不同轴度)
硬度	挤压变形，冲蚀磨损	过热，过载，气穴
耐腐蚀性	腐蚀磨损	润滑剂劣化(过热)润滑剂污染(水、燃油、冷冻剂、燃烧产物)

检测与试验。在表3.14-62所列的六种特征中，只有硬度可以用实验室的标准试验方法进行满意的测量。为了评价和检测其他特性及它们相互间的作用，滑动轴承工业开发了许多专用的动态试验台架和试验方法。其中最常用的实验方法就是设计让轴承试件承受与实际工况定性地相似的运行条件，但是针对一个或多个参数，如载荷、表面速度、运行温度、润滑剂的供给以及润滑剂的清洁度可以进行更大力度的定量模拟。

虽然通过实验室的台架试验可以获得许多有用的数据，但是往往还是有必要试验轴承的材料，并且设计全尺寸试验机，以便准确地获得其完整的适合度。这种试验肯定既昂贵又费时，故只有对轴承的工况条件和以往类似用途的经验进行了充分的分析才能采用这种试验。

轴承材料显微组织。除了银以外，所有工业用的重要轴承材料都是多相合金。如下所列，这些多相合金可以按其显微组织的基本类型进行分类。

- 类型I：软机体中含有离散硬颗粒。铅和锡的巴氏合金属于这种类型。
- 类型II：互锁着的软相和硬连续相。许多的铜-铅和含铅青铜合金都属于这一类型。
- 类型III：含有离散软相穴的强基体。低铅青铜和某些铝-锡合金属于这一类型。
- 混合显微组织就是其特征是由类型I和III相混合的，由Al-Si-Sn合金和Al-Si-Pb合金所代表的。

多层结构的影响。公认最为有用的轴承材料设计理念之一形成于1941年，这就是铅、锡合金以多层薄层紧密地粘结在较高强度的青铜或钢的轴承衬背上，以此大大提高其有效承载能力和疲劳强度。构成其应用的原理就是利用通常厚度不超过0.13mm(0.005in)的铅或锡合金表面层的双层结构(见图3.14-64)。这种表层提供了一种将不会减弱的相容性，并由此获得高度的适应性和嵌入性。借助在表层合金与钢衬背之间所使用的铜或铝合金中间层，可以在表面和整体的性能之间取得两者有效的兼顾。在这些三层结构中，所采用的厚度薄至0.013mm(0.0005in)的表面层，可以在表面和整体的性能之间获得比双层所能得到的更为有益的兼顾。

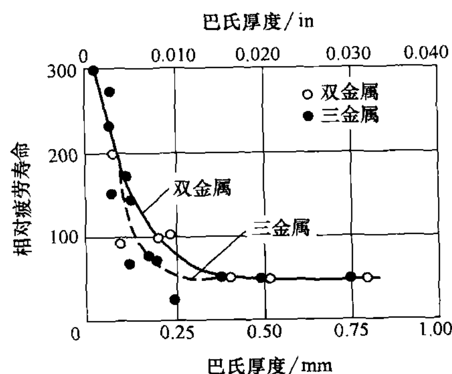


图3.14-64　轴承疲劳寿命对铅合金巴氏表面层厚度的曲线，而这种表面层与所用层数有关，轴承载荷为14MPa(2ksi)

热和温度影响。对于指定用途的轴承材料的选择来说，在高温下轴承衬套机械强度的下降是一个重要的考虑因为。疲劳强度、压缩屈服强度和硬度随轴承的工作温度的上升而显著下降，故低熔点、铅基和锡基轴承合金在这方面受到最为严重的限制，而铜合金受限制最小。铝合金的高温轴承性能则介于铅/锡和铜合金之间(见图3.14-65)。

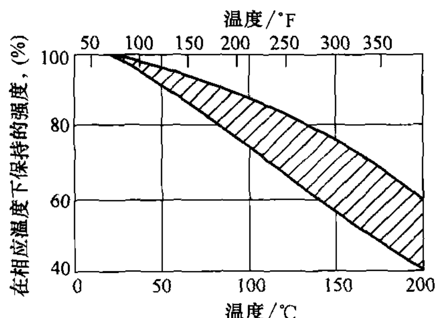


图3.14-65 铝基轴承合金在高温下保持强度

轴承材料系统

由于轴承必须运行的工作条件的多样性，工业用轴承材料已经逐渐成为专用的工程材料系统而不只是商品。它们的使用吨数相对较小，只由相对较少的制造商生产。合金的配方和工艺方法包含很多专利技术，其中包括铸造工艺(漏模、连续和离心铸造)、粉末冶金(连续烧结、浸渍和浸渗，以及粉末轧制)和轧制粘结。为了特定用途的轴承材料和/或工艺方法的成功选择，常要求用户和轴承制造商之间要有紧密的技术合作。

单金属系统

大多数单金属滑动轴承不是用铜合金就是用铝合金制成的。某些用途上也使用铸造锌基合金，它们以其低成本作为同质青铜的替代品。

单金属系统并没有特别好的表面性能，它们对边界润滑和油膜润滑条件的承受能力十分有限。因此，单金属轴承的额定承载能力比起用以制造的材料的疲劳强度相对较低。由于它们在冶金方面的简单性，这些材料都很适合用铸管或棒材进行小批量生产，并利用传统的切削加工工艺。

铜合金。除了工业用青铜和低铅锡青铜以外，单金属系统的铜合金几乎都是以铸造形式被应用的。这就使其具有较厚轴承壁(≥3.20mm 或 0.125in)，由于它们有足够的强度，故当将轴承压入轴承座配合时能正确到位。

工业用青铜和中铅锡青铜合金 C83420 和 C83520 是以锻压青铜带的形式广泛用于薄壁轴瓦，这种产品通过高速冲压成形，大批量生产。将石墨树脂膏嵌渗入轧制或冲压成的凹面上，可以提高这些合金相对较差的相容性，因此轴瓦的工作表面是由石墨和青铜的相互扩散区构成的。这种轴瓦广泛应用于汽车发动机的起动电动机上。

在含铅锡青铜中的铅是以游离铅的形式而存在的，游离铅分散在整个铜锡基体中，故其轴承表面是由铅和青铜的相互扩散区所构成的。一般来说，对于一指定用途从这类材料中做出的最佳选择将是最高的含铅成分，从而在其应用中不必担心过度的磨损、塑性变形和疲劳损坏。

铝合金。事实上，所有美国使用的实体铝轴承都是用含有 5.5%~7% Sn 再加上较为少量的铜、镍、硅和镁的合金制造而成的。轴承制造的原始材料包括铸管以及轧制的板材和带材，它们能冲压成形为半圆形。如同实体青铜轴承的情形，实体铝合金轴承要使用相对较厚的轴承壁厚。

这种合金中的锡是以游离锡的形式而存在于整个铝基体里面，因而轴承表面是由铝和锡的扩散区所构成的。用游离锡使表面性能增强的方式与游离铅使青铜得以增强的方式非常相似。

铝的高热膨胀性会造成保持压装配合和运转间隙方面的特殊问题。采用不同的方法提高屈服强度(例如热处理和冷变形加工)来克服在工作温度和工作载荷的作用下发生的塑性流动和永久变形。

锌合金。在过去的 20 年里，Zn-Al-Cu 铸造合金在某些低速机器的轴承用途里用于代替铸造青铜合金。这些合金并不含有相当于在轴承青铜中使用的铅和铸造铝轴承合金中的锡的任何软微量组分。锌基合金的相容性在很大的程度上似乎都是取决于它们与烃类润滑剂有关的化学特性。

疏松金属轴承。油浸渍的疏松金属轴瓦(自润滑轴承)也可以包括在单金属系统的类别中。应用这些轴瓦的材料包括不含铅和含铅的锡-青铜、青铜-石墨、铁-碳、铁-铜以及铁-青铜-石墨制品。

双层金属系统

所有的双层合金系统都要使用一种很强的轴承衬背，而较软、较弱和相对较薄的合金轴承薄层利用冶金方法粘结在衬背上面。迄今，低碳钢是应用最广的轴承衬背材料，虽然合金钢、青铜、黄铜和(有限的)铝合金也有使用。当使用钢轴承衬背时，铜和铝的两种合金轴承的额定承载能力大大高于其相应单金属的，且不会影响其他任何性能。

青铜衬背材料不会表现出与钢衬背轴承有很大不同的性能特征组合。青铜作为轴承衬背的实际优势，部分在于小批量制造的经济性和当青铜衬背磨损后，通过重新浇铸巴氏合金和再加工进行修复也相对更容易。从性能的观点来看，作为轴承衬背材料，青铜比钢具有的优点是，一旦轴瓦发生严重的磨损或疲劳，青铜能提供防止发生突发性咬死的保护。铝合金轴承

也能提供类似的保护。

虽然青铜轴承衬背材料的表面性能并不显露，但它们还是优于钢的，并且这些“保留的”轴承性能对于在某些关键用途中的大型、价格高昂的机器，可能会有相当大的实际意义。

三层金属系统

实际上，所有三层金属系统都使用一种钢轴承衬背、一种强度相对较高的中间层以及一层锡合金或铅合金表面层。大部分的这些系统都是在钢衬背的双层金属的基础上增加一层铅基或锡基的表面层。

在具有厚度≤0.025mm(≤0.001in)的电镀铅合金表面层的那种系统里，薄层结构的强化作用是十分显著的。这些系统的额定疲劳强度和承载能力与那些相应的双层金属系统的比较表明，薄的铅合金表面层所提高的不仅是表面性能而且还有疲劳强度。疲劳强度的提高应至少部分地归功于引起疲劳裂纹开始扩张的应力集中源的消除。

具有电镀铅基表面层和铜或铝合金中间层的三层系统，为成本、疲劳强度及表面性能的结合提供了最大的可能性。这种轴承对于边界润滑和薄膜润滑都有很高的承受能力，故具有比任何一种双层金属系统更高的承载能力。

轴承材料

锡基合金

锡基轴承材料(巴氏合金)是一种锡、锑和铜的合金，另外还含有有限的锌、铝、砷、铋和铁。按照ASTM B23、SAE和ISO技术规范的规定，锡基轴承合金的成分如表3.14-63所示。

表3.14-63 锡基轴承合金的代号和名义成分

代号[①]			ASTM (B23)	化学成分(质量分数,%)				产品形式	应用
UNS	SAE	ISO		Sn	Sb	Cu	其他		
L13910	—	—	合金1	91	4.5	4.5	—	浇铸在钢或青铜衬背上	双层金属表面层
L13870	—	—	合金11	87	7	6	—	浇铸在钢、青铜或钢衬背青铜面上	双层和三层金属表面层
L13890	合金12	SnSb8Cu4	合金2	89	7.5	3.5	—	浇铸在钢、青铜或钢衬背青铜面上	双层和三层金属表面层
L13840	—	—	合金3	84	8	8	—	浇铸在钢或青铜衬背上	双层金属表面层
—	—	SnSb12Cu6Pb	—	80	12	6	2Pb	浇铸在钢衬背上	双层金属表面层

①UNS，统一编号系统；SAE，美国汽车工程师学会；ISO，国际标准化组织；ASTM，美国材料和试验学会。

在这些轴承金属中，锌的存在一般是无益的。砷的增加在所有的温度下都能防止其变形，而锌只有在38℃(100℉)有类似的作用，但是在室温下引起的变化极小甚至没有。锌对于其中一些合金的显微组织有明显的影响。少量的铝(甚至<1%)将能改善它们的显微组织。铋的作用是有害的，因为它与锡结合后，会形成一种在137℃(279℉)的温度里熔化的共晶体。在高于共晶温度下，合金的强度显著下降。

表3.14-64所列是ASTM牌号1~3的整体力学性能。这些性能对于合金的初始材料筛选比较具有价值，但是用这些数值预测在强劲衬背上所粘结薄层的工作效能并不可靠，这只是锡基巴氏合金在现代轴承技术中常用的方法。层厚影响(见图3.14-64)和温度影响(见图3.14-65)是比由不同的合金成分引起的力学性能差异更为重要的实际考虑。

表3.14-64 冷铸锡基轴承合金的典型力学性能

代号				压缩屈服强度[①]				抗拉强度		伸长率	硬度HB	
UNS	SAE	ISO	ASTM (B23)	20℃ (68℉)		100℃ (212℉)		20℃(68℉)		20℃ (68℉), (%)	20℃ (68℉)	100℃ (212℉)
				MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi			
L13910	—	—	合金1	30.3	4.40	18.3	2.65	64	9.3	2	17.0	8.0
L13890	合金12	SnSb8Cu4	合金2	42.1	6.10	20.7	3.00	77	11.2	—	24.5	12.0
L13840	—	—	合金3	45.5	6.60	21.7	3.15	69[②]	10.0[②]	1[②]	27.0	14.5

①0.125%条件屈服强度。 ②压铸合金试件的数值。

与大多数其他轴承材料比，锡合金的耐疲劳性很低，但是它们的强度足以保证它们在低载条件下的使用。这些合金在工业上容易粘结和处理，并且它们具有优异的抗咬死性能。优异的耐腐蚀性能使这些合金特别适合用于压缩机、电动机和食品处理设备里的轴承上。

铅基合金

铅基轴承材料（铅巴氏合金）是铅、锡、锑以及在许多情况下还有砷的合金。许多这类合金也许正是因为具有的这些众所周知的性能而被作为典型金属应用了多少个几个世纪，并成为最早使用的轴承材料。自从1938年人们就逐渐认识到加入砷的好处。表3.14-65列出了按照ASTM、SAE和ISO技术规范规定的一些使用最为广泛的铅巴氏合金的名义成分。其中一些合金的力学性能见表3.14-66。

表3.14-65 铅基轴承合金的代号和名义成分

代号				化学成分（质量分数，%）					产品形式	应用
UNS	SAE	ISO	ASTM（B23）	Pb	Sb	So	As	其他		
L53346	合金13	PbSb10Sn6	合金13	84	10	6	—	—	浇铸在钢衬背或钢衬背青铜面上	双和三层金属表面层
L53585	合金14	PbSb15Sn10	合金7	75	15	10	—	—	浇铸在钢衬背上	双层金属表面层
L53620	合金15	PbSb15SnAs	合金15	84	15	1	1	—	浇铸在钢衬背上	双层金属表面层
—	—	PbSb14Sn9CuAs	—	77	14	9	0.5	1Cu	浇铸在钢衬背上	双层金属表面层
L53565	—	—	合金8	80	15	5	0.5	—	浇铸在钢衬背上	双层金属表面层
—	—	—	①	87.5	9	3.5	—	—	浇铸在青铜衬背上	双层金属表面层

①ASTM B67。

表3.14-66 冷铸铅基轴承合金的典型力学性能

代号				压缩屈服强度①				抗拉强度		伸长率	硬度HB	
				20℃（68℉）		100℃（212℉）		20℃（68℉）		20℃（68℉）（%）	20℃（68℉）	100℃（212℉）
UNS	SAE	ISO	ASTM（B23）	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi			
L53346	合金13	PbSb10Sn6	合金13	22.8	3.30	10.7	1.55	69	10.0	5	19	8.5
L53585	合金14	PbSb15Sn10	合金7	24.5	3.55	11.0	1.60	72	10.5	4	22.5	10.5
L53620	合金15	PbSb15SnAs	合金15	24.8	3.60	14.5	2.10	71	10.4	2	21	13
L53565	—	—	合金8	23.4	3.40	11.0	1.60	69	10.0	5	20	9.5

①0.125%条件屈服强度。

多年以来，铅基轴承合金被认为是锡合金仅有的一种廉价替代品。然而，这两组合金在抗咬死的特性方面并无很大的不同，而且当铅基合金与钢衬背一起使用且厚度 <0.75mm（<0.03in）时，它们的耐疲劳性若不是更好的，也至少是等于锡合金的。任何一种这类轴承当厚度 ≤0.13mm（≤0.005in）时（见图3.14-64），都能保持最长的使用寿命。

当这些合金不含有砷时，合金的显微组织是

由 SbSn 或锑的立方形初晶镶嵌在以铅为基体的 Pb-Sb-SbSn 三元混合物里构成的。合金单位体积中含有的这种立方体的数量随锑含量的提高而增加。如果锑的含量 >15%，其硬质组分的总量则会增加到合金因为变得太脆而无法作为轴承材料使用的程度。

在铅巴氏合金中，加入砷以提高其力学性能，尤其在高温下的性能。当所有铅巴氏合金长时间暴露在 95 ~150℃(200 至 300℉)里时，如用于内燃机的轴承上都会发生软化或丧失强度。砷的加入可以将这种软化降到最低限度。在合适的铸造条件下，含砷铅巴氏合金——例如 SAE 15(ASTM 牌号 15)会形成相当细且均匀的组织。它们具有比无砷合金更好的疲劳强度。

浇注的温度和冷却的速度会显著影响铅合金的显微组织和性能，特别当它们作为重型轴瓦应用于铁路轴颈上时。由过热的型芯造成的高浇注温度和低冷却速度会导致偏析和粗糙组织的形成。粗糙的组织又会造成脆性、低压缩强度和低硬度。因此，通常推荐使用 325 ~345℃(620 ~650℉)的低浇注温度。因为这些合金一直冷却到几乎完全凝固点的温度(对于大部分成分组成为 ~240℃ 或 465℉)时都能保持相对流动，故而它们容易操控和处置，而不会因金属浮渣造成很大的金属损耗。

铅基电镀表层。人们已注意到通过减小巴氏合金层的厚度可以改善疲劳寿命。从经济以及机械的方面来看，借助于铸造技术连续均匀地将非常薄的巴氏合金层粘结在双金属层壳体上，是非常困难的。因此，将薄且精密的巴氏合金层电镀在一个非常精确的双金属层壳体上的技术则堪称完美。特制的电镀设备可以使电镀的巴氏合金层的厚度控制在很高的精度内，从而无需进一步的切削加工。

电镀锡合金一般比铅合金差，而且只有铅合金可以在工业上作为轴承的电镀层使用。SAE 合金 192 (88Pb10Sn2Cu) 是使用最多的。锡在合金 191 (90Pb10Sn)、192 和 193(80Pb18Sn2Cu)和铟在合金 194(93Pb7In) 中形成耐腐蚀性。锡还能提高耐磨性。铜和铟都能增强其耐疲劳性。电镀层的厚度一般从 0.013 ~0.05mm(0.0005 ~0.002in)，随其厚度的减小，疲劳寿命也显著提高。

铜基合金

铜基轴承合金构成了性能范围很广的一族材料。它们包括工业用青铜、铜-铅合金以及含铅和不含铅的锡青铜。它们能单独用于单金属轴承，也可以作为粘结巴氏合金表面层的轴承衬背、双金属层粘结在钢衬背上以及钢衬背的三金属层轴承的中间层使用。

纯铜通过合金很容易使具有中等强度和硬度的性能得到提高，最常用的是加入锡(铜用以形成一种固溶体)。铅作为一种近乎纯净的离散相存在于铸造铜基轴承合金中，因为它在基体中的固溶度实际为零。暴露于轴承运转表面上的铅相会在一定的工作条件下形成易于遭受腐蚀的晶格点。

铜基轴承合金的抗磨特性会因其含铅量的增加而提高，尽管与此同时，由于铜合金基体的连续性遭受软弱铅的不断阻断而导致其强度的下降。于是通过对锡、铅含量和显微组织的适当控制就能得到一大族的轴承合金，用以满足多种多样的轴承用途。

表 3.14-67 列出铜基轴承合金的技术标准的编号和名义成分，还有合金应用的产品形式和典型产品的应用说明。表 3.14-68 所列的是铜基轴承合金的力学性能的范围。

表 3.14-67 铜基轴承合金的代号和名义成分

编号	代号				成分(质量分数,%)				产品形式	应用
	UNS	SAE	ISO	其他	Cu	Sn	Pb	Zn		
工业用青铜										
1	C83420	合金 795	—	—	90	0.5	—	9.5	压制带材	实体青铜轴瓦和垫圈
无铅锡青铜										
2	C52100	—	CnSn8P	—	92[①]	8	—	—	压制带材	实体青铜轴瓦和垫圈
3	C90300	—	—	—	88	8	—	4	铸管	实体青铜轴承
4	C90500	—	—	—	88	10	—	2	铸管	实体青铜轴承
5	C91100	—	—	—	84	16	—	—	铸管	实体青铜轴承
6	C91300	—	—	—	81	19	—	—	铸管	实体青铜轴承

（续）

编号	代号				成分(质量分数,%)				产品形式	应用
	UNS	SAE	ISO	其他	Cu	Sn	Pb	Zn		
低铅锡青铜										
7	C92200	—	—	—	88.5	6	1.5	4	铸管	实体青铜轴承
8	C92300	—	—	—	87	8.5	0.5	4	铸管	实体青铜轴承
9	C92700	—	—	—	87.5	10	2	0.5	铸管	实体青铜轴承
中铅锡青铜										
10	C83520	合金791	—	—	88	4	4	4	压制带材	实体青铜轴瓦和垫圈
11	—	—	—	F32/F62	88	4	4	4	浇铸在钢衬背上	双层金属层轴瓦和垫圈，三层金属层的中间层
12	C83600	—	CuPb5Sn5Zn5	—	85	5	5	5	铸管	实体青铜轴承，青铜轴承衬背
13	C93200	—	CuSn7Pb7Zn3	—	83	7	7	3	铸管	实体青铜轴承
14	—	合金793	—	—	88	4	8	—	浇铸在钢衬背上	双层金属的表面层
15	—	合金793	—	—	88	4	8	—	烧结在钢衬背上	双层金属的表面层
16	C93700	—	CuPb10Sn10	—	80	10	10	—	铸管	实体青铜轴承，青铜轴承衬背
17	—	合金792	CuPb10Sn10(G)	—	80	10	10	—	浇铸在钢衬背上	双层金属层的表面层，三层金属层的中间层
18	—	合金792	CuPb10Sn10(P)	—	80	10	10	—	烧结在钢衬背上	双层金属层的表面层
高铅锡青铜										
19	C93800	—	—	—	78	7	15	—	铸管	实体青铜轴承，青铜轴承衬背
20	—	—	—	AMS 4825	74	10	16	—	浇铸在钢衬背上	双层金属层的表面层
21	—	合金794	CuPb24Sn4(G)	—	73.5	3.5	23	—	浇铸在钢衬背上	双层金属层的表面层，三层金属层的中间层
22	—	合金794	CuPb24Sn4(P)	—	73.5	3.5	23	—	烧结在钢衬背上	双层金属层的表面层，三层金属层的中间层
23	—	—	—	F112	72.5	2.5	25	—	浇铸在钢衬背上	三层金属层的中间层
24	C94300	—	—	—	70	5	25	—	铸管	实体青铜轴承
铜-铅合金										
25	—	合金49	CuPb24Sn(G)	—	75	1	24	—	浇铸在钢衬背上	三层金属层的中间层
26	—	合金49	CuPb24Sn(P)	—	75	1	24	—	烧结在钢衬背上	三层金属层的中间层
27	—	合金48	CuPb30(P)	—	70	—	30	—	烧结在钢衬背上	双金属层的表面层，三层金属层的中间层
28	—	合金485	—	—	48	1	51	—	烧结在钢衬背上，用铅浸渗	双金属层的表面层

①也为0.3P。

表 3.14-68 铜基轴承合金的典型室温力学性能

合金族	产品形式	压缩屈服强度①		抗拉强度		硬度 HB
		MPa	ksi	MPa	ksi	
工业用青铜	压制带材	—	—	310~440	45~64	78~115
无铅锡青铜	压制带材	—	—	400~580	58~84	80~160
	铸管	90~125	13~18	240~310	35~45	70~170
低铅锡青铜	铸管	—	—	275~290	40~42	65~77
中铅锡青铜	压制带材	—	—	310~440	45~64	78~115
	铸管	90~100	13~14	240~255	35~37	60~65
	钢衬背	—	—	—	—	50~130
高铅锡青铜	铸管	75~85	11~12	185~210	27~30	48~55
	钢衬背	—	—	—	—	55~90
铜铅合金	钢衬背	—	—	—	—	30~80

①0.1%条件屈服强度。

工业用青铜。无铅铜合金的特征就是抗摩性很差，但是有较好的承载能力。含有10% Zn的锻压工业用青铜带材(SAE795)易于压制成圆柱形的衬套和推力垫圈。这种不太贵的材料可通过冷变形加工提高强度。

无铅锡青铜。无铅铜合金也就是所谓的磷青铜，因为它们用磷还原。它们主要以铸造形式的型材用于特种用途，或以圆棒或管材用于切削加工成实体轴承。它们有优异的强度和耐磨性，而且两者都能通过增加锡含量而得以提高，然而表面性能较差。它们应用于桥墩转盘、与高强度钢接触的枢轴以及其他的一些低速运动的用途。

低铅锡青铜。锡青铜所固有的低切削性可以通过加入少量铅而得到改善。这种加入并不能明显提高表面性能，然而这种合金的应用却与无铅锡青铜基本一样。

中铅锡青铜。这组合金中仅有的压制带材料就是SAE791，将其冲制成形为实体轴瓦和推力垫圈。C83600以铸造形式作为轴承衬背用于双层金属轴承里。SAE793是一种低锡、中铅合金，将其浇铸或烧结在钢衬背上，并且作为表面层用于中等载荷的双层金属轴瓦。SAE792有较高含锡量和稍高含铅量，它被浇铸或烧结在钢衬背上，并应用于重载的用途如关节肖的轴瓦和重载推力表面。

高铅锡青铜。这种材料含有从中到高含量的锡和相对较高的铅含量，以此明显提高其抗摩特性。SAE794广泛应用于承受旋转载荷的轴瓦中，它具有与SAE793(4.5% Sn)一样的青铜基体，但是所含游离铅高达三倍之多。它浇铸或烧结在衬背上，并应用于速度比合金793高而载荷较其小的一些用途里。SAE794青铜基体的强度远远超过普通的75-25铜-铅合金。合金794可作为电镀中间层应用于重载的三层金属轴承用途里，如卡车柴油发动机的主轴承和连杆轴承。这种结构提供了铜合金三层金属轴承所有的最大承载能力。

铜-铅合金。它们广泛应用于汽车、飞机和一般的工程用途。这种合金被浇铸或烧结在钢衬背带上，再根据最终用途的需要将其冲落或压制成形为全圆或半圆形的零件。连续浇铸在钢带上的铜-铅合金一般由垂直并牢牢地紧固在钢衬背上带有枝晶间铅相的铜晶枝所构成的。相应的，具有相似成分的烧结铜-铅合金是由带有晶粒间铅相的等轴晶粒所构成的。

高铅合金SAE48能以裸体形式直接用于钢或铸铁的轴颈上。将这种合金里的含锡量限制在最小值，使之保持一种较软的铜基体，它与高含铅量一起改善合金的抗摩擦/抗咬死的性能。铜-铅的裸体双层金属轴承如今已经不常使用，因为近似以纯铅而存在的铅相，容易遭受曲轴箱内的润滑油在延续的换油期内所产生的腐蚀性产物的侵蚀影响。因此，包括SAE合金48和合金49在内的大部分含铅量>20%的铜基合金，现在都以带电镀层的三层金属轴承应用于汽车和柴油发动机。

SAE485是一种特殊的烧结和浸渗复合材料，利用这种方法有可能将强度非常高的连续铜合金基体组织与高含铅量结合起来，并且将富铅组分与足量的锡熔成合金使之具有耐腐蚀性。SAE485主要用于轴瓦

和轴承上，这些用途会有不同轴度、轴颈表面粗糙度或偶尔还有的尘土污染等方面的问题。

铝基合金

铝合金在普通滑动轴承里的成功应用可以上溯到约1940年，当时低锡铝合金铸件开始替代实体的青铜轴承在重型机器中应用。大约到1950年，在工业上成功实现轧制粘结钢衬背的带材生产，从而通过利用铝合金代替巴氏合金和铜合金使双层和三层金属轴承材料系统的实际应用得到发展。

铝的易于获得性及其相对稳定的成本有力地推动了它在滑动轴承中应用的持续发展。铝的单金属、双层金属和三层金属系统现在都能在与巴氏合金、铜-铅合金以及高铅锡青铜相同的载荷范围里得到应用。进而，铝的突出耐腐蚀性近年来已日益成为促成铝合金材料(代替铜-铅合金和含铅青铜)在汽车发动机轴承中广泛应用的重要依据。

代号和成分。在工业上广为应用的铝基合金的合金代号和名义成分如表3.14-69所列。在这些合金中，硅、铜、镍、镁和锌加入的作用是通过固溶和析出的机制强化铝。耐疲劳性以及一些与适应性和嵌入性相抵触的性能都在很大程度上受控于上述这些元素和所采用的相宜热处理。锡和铅有助于提高铝本身较差的相容性。镉也能以同样的目的作为合金元素使用。硅除有中等的强化效果外，还有利于相容性。虽然理论上尚未完全搞清楚，但这种相容性增强的机制有相当的实用价值。为此，硅能有效地应用于许多合金(通常与锡、铅或镉结合使用)。

表3.14-69 铝基轴承合金的代号和名义成分

No.	代号				成分(质量分数,%)							产品形式	应用
	UNS	SAE	ISO	其他	Al	Si	Cu	Ni	Mg	Sn	其他		
高锡合金													
1	A08081	合金783	AlSn20Cu	—	79	—	1	—	—	20	—	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
2	—	合金786	—	—	59.5	—	0.5	—	—	40	—	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
高铅合金													
3	—	合金787	—	F-85	85	4	1	—	—	1.5	8.5Pb	粉末冶金轧制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
4	—	合金787	—	Al-6	88.5	4	0.5	—	—	1	6Pb	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
中锡合金													
5	—	合金788	—	SA-151	82.5	3	1	—	—	12	1.5Pb	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
6	—	合金788	—	AS-124	82	4	2	—	—	12	—	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
7	—	合金788	—	A-17-X	83	2.5	0.7	—	—	12	2Pb, 0.2Sb	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层
8	—	合金788	—	FA-130	81	3	0.7	—	—	13	2Pb, 0.2Sb, 0.2Sr	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层

（续）

No.	代号				成分（质量分数，%）							产品形式	应用
	UNS	SAE	ISO	其他	Al	Si	Cu	Ni	Mg	Sn	其他		
低锡合金													
9	—	—	AlSn6CuNi	—	91.5	—	1	1	—	6.5	—	铸管	实体铝合金轴承
10	A08500	—	—	—	90.5	—	1	1	1	6.5	—	铸管	实体铝合金轴承
11	A08510	—	—	—	89.5	2.5	1	0.5	—	6.5	—	铸管	实体铝合金轴承
12	A08520	—	—	—	89.5	—	2	1.2	1	6.5	—	铸管	实体铝合金轴承
13	A08280	合金780	—	—	90.5	1.5	1	0.5	—	6.5	—	压制带材和板材	实体铝合金轴承
14	—	合金770	AlSn6CuNi	—	91.5	—	1	1	—	6.5	—	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层，三层金属中间层
15	A08280	合金780	—	—	90.5	1.5	1	0.5	—	6.5	—	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层，三层金属中间层
无锡合金													
16	A04002	合金781	AlSi4Cd	—	95	4	0.1	—	0.1	—	1Cd	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层，三层金属中间层
17	A04002	合金781	AlSi4Cd	F-154	95	4	0.1	—	0.1	—	1Cd	压制带材，粘结在钢衬背上，并析出硬化	三层金属中间层
18	—	合金782	AlCd3CuNi	—	95	—	1	1	—	—	3Cd	压制带材，粘结在钢衬背上	双层金属的表面层，三层金属中间层
19	—	合金784	AlSi11Cu	—	88	11	1	—	—	—	—	压制带材，粘结在钢衬背上	三层金属中间层
20	—	合金785	AlZn5Si2CuPb	—	91.5	1.5	1	—	—	—	5Zn，1Pb	压制带材，粘结在钢衬背上	三层金属中间层

力学性能。铝基轴承合金的力学性能对于所期待的加工特性比所期待的工作性能更有价值。实体的铝合金轴承没有钢衬背，并且其压配合的保持也完全取决于铝合金的强度，故除它们之外的其他成品轴承的

力学性能很少有进行规定的，有也只是作为控制用的。然而其中一些力学性能(表3.14-70)能作为设计依据，也正是基于对这些合金作为相关工程材料一族的深刻认识，以及对它们与除前面已经讨论过的铜基、锡基和铅基轴承合金以外，已了解较多的结构用铝合金之间关系的深刻认识。

表3.14-70　铝基轴承合金的典型室温力学性能

合金族	产品形式	压缩屈服强度①		抗拉强度		硬度
		MPa	ksi	MPa	ksi	HB
高锡合金	钢衬背	—	—	100~130	15~19	25~40
高铅合金	钢衬背	—	—	—	—	40~50
中锡合金	钢衬背	—	—	—	—	50~60
低锡合金	铸管	70~140	10~20	125~220	18~32	45~65
	压制厚板	80~140	12~120	140~170	20~25	40~55
	钢衬背	—	—	—	—	35~45
无锡合金	钢衬背	—	—	—	—	35~65

①0.2%条件屈服强度。

产品应用。目前工业上应用的主要铝基轴承合金包括钢衬背的双层或三层金属轴承。为一特定用途决定成本效率最高的铝材料，应当考虑双层金属对于三层金属系统在经济上的优势。高锡和高铅的较高成本常可以通过剔除铅合金表面镀层板的成本而得到补偿。如果三层金属材料要求有较高承载能力，那么重要的是选择一种既适中又不过高强度的铝衬套合金，从而无需让适应性和嵌入性作出不必要的牺牲。无锡合金组(表3.14-69中的合金16~20)具有很宽的强度性能范围，最为经济的选择通常也就在这一组合金中。

其他轴承材料

锌基合金。能成功应用于机器轴承的锌基合金是Zn-Al-Cu-Mg的标准锌铸造合金，属于高性能型(合金ZA-12和ZA-27)。用传统砂型、金属型和压铸型制造的管状型材都可采用与实体青铜轴承相同的方法切削加工成轴承。大多数的用途都是直接替代实体青铜轴承，这种替代主要也是为了降低成本。锌基轴承合金最高推荐温度范围为95~120℃(205~250℉)，它比铜基和铝基轴承合金的极限温度低约100℃(180℉)。

银基合金。银在轴承上的应用大多限于电镀在钢壳体上的非合金银(AMS4815)，然后将其切削加工成精度非常高的尺寸并通过一种软金属薄层的精密电镀，使之到达最终尺寸。该镀层可以为铅-锡、铅-锡-铜、铅-铟或在某些情况下为纯铅。镀银作为轴承材料总是与一种镀层一起使用。与镀层一起用于钢上面的银被认为是最终的耐疲劳轴承材料。

灰铸铁。它们是用于包含摩擦和磨损用途(例如制动鼓、活塞环、缸套和齿轮)上的标准材料。铸铁在这类用途中能很好地运行，故应将其作为轴承材料来考虑。

硬质合金。这是一种包括烧结碳化钨、碳化钛以及其他制品的极硬材料，并已成功地应用于各种专用轴承和密封的用途。依据表3.14-62所列的轴承的性能特征，这些材料展现的适应性和嵌入性基本为零，但是有极高的强度、硬度、耐腐蚀性和相容性。

非金属轴承材料。它们广泛应用于种类繁多的用途里。它们具有许多超过金属的固有优势，包括较高的耐腐蚀性、较轻的重量、较好的抗机械冲击性，并且具有在非常边界润滑或干脆没有润滑剂条件下运行的能力。大多数非金属的主要缺点是它们的高热膨胀系数和低热导率特征。许多年以来，碳-石墨、木头、橡胶和层状酚醛塑料一直在非金属轴承材料中占有统治地位。早在20世纪40年代，尼龙和聚四氟乙烯(PTFE或特氟隆)的开发让工程设计人员得到了两种特征非常独特的新非金属材料，特别具有干运行的能力。

种类繁多的聚合材料目前正非常成功地应用于轴承的用途。将增强纤维和填料如固体润滑剂和金属粉末，加入树脂基体里，可以有效地提高这些塑料的物理、热学和摩擦学的性质。

精选参考文献

- G.R. Kingsbury, Friction and Wear of Sliding Bearing Materials, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol 18, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, p 741–757.
- R. Pike and J.M. Conway-Jones, Friction and Wear of Sliding Bearings, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol 18, *ASM Handbook*, ASM International, 1992, p 515–521.

第16节　生物材料

Matthew Donachie，康涅狄格州生物医学工程联盟(BEACON)和伦塞勒理工学院哈特福特分院

生物材料是指人造的应用于人体体内的金属、陶瓷和聚合材料。在体内可以用以作为硬组织或软组织使用。本节主要关注金属材料，有关陶瓷、聚合材料、复合材料、粘结剂和胶合剂只是略作涉及，特别是它们与金属材料间的相互作用。

在人体里，金属往往用于矫形的目的如髋关节假肢柄、关节球头和膝关节等，这些地方的硬组织(骨质结构)必须进行修复或置换。金属还能应用于如扩张支架(冠状动脉)、导管和外壳(心脏起搏器)和外科手术用的接骨板或骨螺钉。金属在牙科上的应用集中在用银汞合金或金修补蛀洞或置换破齿，用钛合金制造固定牙冠和牙桥桩核，以及用镍-铬合金和钴-铬合金制造牙冠和桥托、局部义齿或作为烤瓷合金牙齿的牙基。不锈钢及一些其他合金在畸齿校正中作为金属丝和薄板使用。

陶瓷可用于髋关节铰接处的球头、移植部分的活性涂层以及牙科方面的一些应用——例如用于填料或搪瓷(一种陶瓷工艺)。经发现，碳可以应用于心脏的阀瓣和牙种植。至于聚合材料，硅酮用于关节移植、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为一种粘结剂(浆料)使用，以及超高分子量聚乙烯(UHMWPE)在髋关节中作为髋关节中的髋臼使用。复合材料尤其是聚合复合材料，都用于牙科用途，它们在其他体内的应用十分有限。预计能在人体内消溶的复合材料或陶瓷已经表明了其潜在的用途。能在人体内消溶的材料并非新近才有，可消溶的缝合线已经应用了许多年了。

人体内工况。材料使用的温度条件不算苛刻，人体内的温度略低于38℃(100℉)。然而，化学生理环境和生物机械学工况应该是严酷的。对于用于修复髋骨的结构性移植，据估计平均不太活跃的人其髋关节一年会有$(1\sim2.5)\times10^6$次的应力作用周期数。对于一个年龄为20~30岁而寿命期望为70~80岁的人来说，其毕生的载荷当量作用周期数大约为10^8。实际载荷及其作用周期数取决于人的体重和活跃程度，但是很显然人们需要有长期的疲劳循环能力。人体内的其他应用也要让所移植的器件或装置能承受几百万次的疲劳周期数。

考虑到人体内材料应用的参数，有几个因素是至关重要的。一般都认为所用材料必须：

- 无毒和不会致癌，几乎不会或根本不会引起外来物在体内的反应，而且具有化学稳定性和耐腐蚀性。这就是所谓的生物相容性。
- 在人体的高腐蚀环境里，能承受高且可变的应力。
- 可以制成复杂的形状和大小。

体内材料的许多结构用途要求移植的材料能适应的空间也许只有作为永久或临时置换或放置部分的1/4。因此，移植体必须能够承受高达16倍以上人体骨骼所应当承受的载荷。在牙科修补术中，由高压咬合力与温度的大幅度变化、酸度的综合形成一种复杂的工作条件。显然，用于结构用途上的生物材料要求有非常高的承受机械载荷能力。

人体的化学组织会造成腐蚀性侵蚀，由此导致移植体的降解和/或释放出会对人体引起负面影响的离子。这种化学的相互作用可以用生物材料的生物相容性一词表征。生物相容性必须考虑离子或分子的释出、这种释出物质的能动性以及释出物质或材料的表面与人体的相互作用。某些离子或分子对人体是严重有害的。在其他情况里，一种材料可能会致癌、形成血栓(造成凝固血块)、细胞变异、引起发烧或造成过敏。释出的离子会造成组织坏死。开发一种生物材料的关键是要找到一种既有必要的力学和/或物理性能又不会对人体造成危害或其危害程度受限的材料。

力学性能。金属一般要求兼具高静态和与周期性相关的性能。拉伸屈服强度和极限强度、弹性模量和疲劳寿命极限是必须确定的主要金属强度特征。温度不成问题。对于牙科材料，它们要在嘴巴里经受非常高的点式受力，其蠕变和压缩屈服强度是很重要的。陶瓷具有极好的屈服强度，因此时常应用于这类用途。拉伸、和弯曲或拉伸疲劳并不是研究陶瓷的主要强度特征，因为拉伸载荷会造成相对快速的非塑性裂纹扩张。

聚合材料的重要力学性能包括抗拉强度、蠕变强度、弹性模量和疲劳强度。蠕变之所以可能重要是因为体内的工作温度远低于聚合材料的熔点或玻璃化转变的温度(高聚物由高弹态转变为玻璃态的温度。通常用T_g表示。没有很固定的数值,往往随着测定的方法和条件而改变。它是高聚物的一个重要的工艺指标。在此温度以上,高聚物表现出弹性;在此温度以下,高聚物表现出脆性,在用作塑料、橡胶、合成纤维等时必须对此加以考虑——译者注)。最早用于髋臼的聚合材料(特氟隆)就是由于蠕变发生极度变形而损坏的。

耐磨性对于所有生物材料也是一个关键所在。过度的磨损会导致置换器件的早期失效。更重要的是磨损颗粒将无法为人体所生物相容。

在理想的条件下，可以在与人体(即在体内)一致的环境里进行力学性能试验。实际上，力学性能试验可以在正常的空气环境或在仿人体的生理溶液中进行，后者的介质降解作用必须经过评价。

腐蚀。用于生物材料的金属必须是贵重金属或能

在体内环境里具有耐腐蚀性。从用于体内的生物材料上可以观察到多种类型的腐蚀，包括一般腐蚀、点蚀和缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳和晶间腐蚀。所有这些腐蚀中除一般腐蚀外，对于外科移植材料而言都是不能允许的。作为一种应考虑人体内耐腐蚀性的材料来说，其一般腐蚀率通常必须小于0.01mm/a（0.00025mm/a）。有关腐蚀的试验步骤及结果的综合论述可参阅《ASM手册》第13卷：腐蚀一章中的“金属移植物和置换装置的腐蚀”和“牙合金的锈蚀和腐蚀”。

陶瓷材料的腐蚀试验实际上不太使用，因为用于结构性移植的氧化物陶瓷的腐蚀性非常小。然而，陶瓷在人体内确实还是会表现出其性能的下降。当氧化铝型的多晶体陶瓷处于体液中时，会丧失其静态强度。这种强度的丧失是一种环境劣化的形式。一般来说，陶瓷的纯度越高、密度越高(疏松度越小)，其在体内的强度越不易降低。具有生物活性的陶瓷代表了与腐蚀所不同的方面，因为可以期待它们通过逐渐释出其阳离子和阴离子，并混入不断生长的骨骼或细胞组织中而最后转变成为骨质组织。生物活性陶瓷的腐蚀试验并非一定要求进行。

聚合材料尽管会在体内发生断裂却不一定都遭受正常意义上的腐蚀。结果可以是其组织与单体残留物间的相互作用，而这种单体残留物又是在聚合作用、聚合材料分子结构经历化学降解作用，以及作为添加剂如增塑剂、滤芯和着色剂所经历的浸析作用以后而遗留下来的。某些聚合材料是特意加入为了在体内的降解(再吸收)，而其余的降解并非特意而为之。聚合材料的衰变会对主聚合链、交联键和侧链基团产生影响。有时会产生不需要的交联键并降解成为一种线性聚合材料，而有时需要的交联键会由于热能或其他元素(例如氧)与聚合材料的相互间作用而发生断裂。某些聚合材料会吸收类脂化合物或者与蛋白质相互作用，偶尔还会发生水解。

人体环境对于人造材料是十分不利的，聚合材料一旦被植入就开始发生降解。氢氧基(OH^-)离子的侵蚀或它与溶解氧的相互作用成为聚合材料降解的主要化学缘由。聚合材料在体内的降解远比金属和陶瓷的侵蚀复杂得多。

规范问题。生物材料离不开控制其使用的规范。要经过若干年的时间，才能认证新材料与以往已经使用并业已证明有效的材料之间有什么实质性的差别。由于认证流程的成本很高，故生物材料的开发及其应用都应遵循已有的流程，或者当要求进行规范认证时至少要申明这样的认证正在进行。

移植用的金属生物材料

金属成功地作为生物材料使用已经很多年了。图3.1-66～图3.1-68所示是以矫形外科为目的的移植应用。图3.1-69是骨髓内柱，并表示了它们用于断裂的固定。还有许许多多的其他结构性的金属移植。

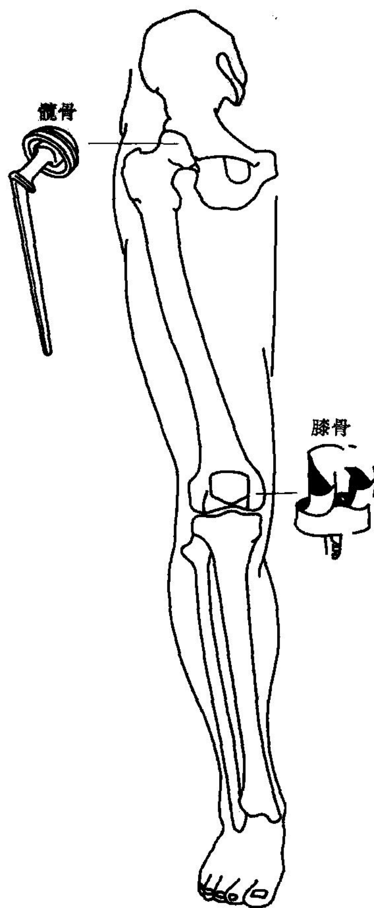


图3.14-66　髋骨和膝骨更换图，图中表示了零件的形状和移植位置

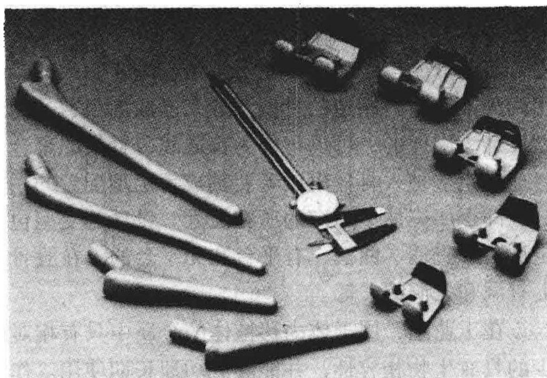
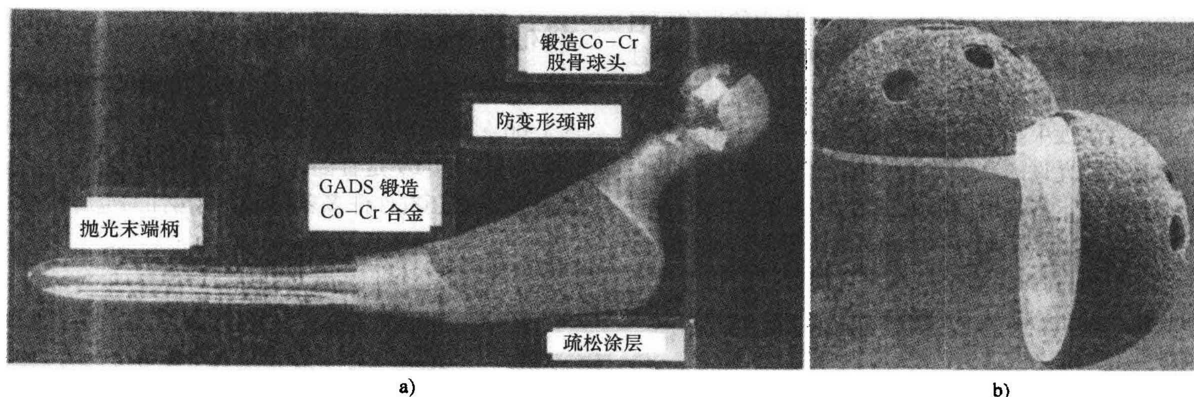


图3.14-67　熔模铸造的钛合金髋骨和膝骨的移植肢体



a)　　b)

图 3.14-68　更换髋关节移植物

a）股骨件，GADS，气体雾化弥散强化合金　b）髋臼球窝件，它与股骨的头部相配合，其特点为等离子喷涂的外壳上带有结构螺纹孔位。照片获准于 Pfizer 医用器械集团，豪梅迪科公司

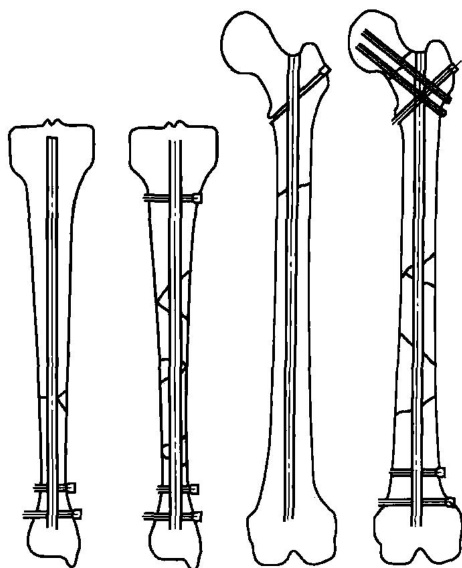


图 3.14-69　骨髓内柱并用锁钉将其固定在胫骨或股骨上

髋关节置换一般要求上股骨（大腿骨）的置换和匹配骨盆（臀骨）部分的置换及其表面的修整。股骨元件通常都是用钴-铬或钛合金制成的。球头（股骨零件铰接部分）是用高度抛光的钴-铬或陶瓷制成的。采用两种不同材料制造的骨柄和球头已成为很普通的定型设计。同样的，可以将作为普通髋臼置换的聚合材料球兜直接植入骨盆里或者使其成为定型配置的一部分，即金属壳体中球窝的所在之处。设计的变型包括定型法、直柄、曲柄、有平台和无平台的、在股骨柄上有洞和无洞的，等。

在工业上，用于体内移植体的金属中只有相对极少的具有生物相容性，并能够成功地长期使用。作为体内结构应用的主要金属有 AISI 316L 不锈钢、源于的高钴铬钼耐蚀耐热合金（No. 21 Haynes Stellite 合金）Vitallium 经改进的钴-铬合金以及 Ti-6Al-4V。黄金的使用也很有限。钽可以作为头颅骨板或外科手术用骨钉（以及不锈钢），就像四种工业纯度级别的钛一样。表 3.14-71 所列是作为外科可移植生物材料使用的合金成分。表 3.14-72 所列为这些合金的相对强度。金属材料的全部化学成分和性质一般都包含在 ASTM 的技术标准范围内。表 3.14-73 选择性地列举了处置可移植的生物材料的 ASTM 技术标准。

疲劳和屈服强度不仅随合金类型而变化（如钛对不锈钢），而且取决于工艺。然而弹性模量也或多或少与合金类型有关。钛合金的模量最低（110 ~ 125GPa 或 $16 \sim 18 \times 10^6$ psi），不锈钢的模量接近 205GPa（30×10^6psi），而钴-铬合金的模量更高一些，大约 240GPa（35×10^6psi）。生物材料在矫形应用中，其弹性模量是一个重要的因素。骨骼具有的模量数量级在 17GPa（2.5×10^6psi）。骨骼与用以承受结构载荷的合金在弹性模量上的差别意味着移植进入的金属装置将以与骨骼不相称的比例分担载荷（应力）。骨骼需适应其作用应力（沃尔夫定律）。由于合金造成应力屏蔽，因适应性而引起的一个后果就是与移植物结合的骨骼不会变得或者保持与没有移植物一样强。理想的合金应该具有镁的弹性模量、钴-铬合金的强度、钛生物材料的耐腐蚀性和生物相容性以及不锈钢的可加工性。

应用于铰接置换用途的合金常与其他生物材料，如 UHMWPE、聚氧化甲撑（Delrin-150）或氧化铝陶瓷一起使用。一种典型的髋骨置换应包括柄杆、球头和有金属支承的球兜。

金属生物材料的化学性质和制造工艺，对于生物医学器械工业而言并非一定很独特。控制不必要的元

表 3.14-71　用于外科移植件的某些金属和合金的成分

金属或合金	成分①(质量分数,%)							
	C	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	其　他
AISI 型号 316 不锈钢	0.08 最大	—	18.5	余量	—	12.0	3.0	0.75Si, 0.03P, 0.03S
铸造钴-铬合金	0.36 最大	—	28.5	0.75 最大	余量	2.5 最大	6.0	1.0$Si_{最大}$
锻压钴-铬合金	0.15 最大	—	20.0	3.0 最大	余量	2.5max	—	15.3W
非合金钛	0.10	余量	—	0.30	—	—	—	0.015H, 0.13O, 0.07N
Ti-6Al-4V	0.08	余量	—	0.25	—	—	—	6.0Al, 4.0V, 0.0125H, 0.13O
MP35N	—	—	20.0	—	35.0	35.0	10.0	—
非合金钽	0.01	0.01	—	0.01	—	—	0.01	余量 Ta, 0.001H, 0.015O, 0.01N, 0.005Si, 0.03W, 0.05Nb

①名义值，另有注明除外。

表 3.14-72　用于外科移植件的某些金属和合金的力学性能

金属或合金	屈服强度		抗拉强度		伸长率(%)	弹性模量	
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10^6psi
316 不锈钢，退火	207	30	517	75	40	—	—
316 不锈钢，冷变形加工	689	100	862	125	12	200	29
铸造钴-铬合金	450	65	655	95	8	248	36
锻压钴-铬合金	379	55	896	130	—	242	35
钛，牌号 4	485	70	550	80	15	110	16
Ti-6Al-4V，退火	830	120	895	130	10	124	18
Ti-6Al-4V，热处理	①	①	①	①	—	—	—
钽，退火	140	20	205	30	—	—	—
钽，冷变形加工	345	50	480	70	—	—	—
MP35N，退火	240~655	35~95	795~1000	115~145	—	228	33
MP35N，冷变形加工和时效	1585	230	1790	260	—	—	—

①遵循买方和制造商之间的协议。

表 3.14-73　所选生物材料的 ASTM 技术标准的选择性

ASTM 编号	生物材料	ASTM 编号	生物材料
F55, F138	低碳不锈钢(型号 316L)	F560	非合金钽
F75, F90	钴-铬合金	F603	高纯度致密氧化铝
F67	工业纯钛	F648	超高分子量聚乙烯(UHMWPE)
F136	Ti-6Al-4V	F881	硅酮胶和固体硅酮
F451	丙烯酸骨胶		

素对于金属生物材料的成功应用是一个重要方面。对于每一种合金的主要要求就是在其植入体内后的耐腐

蚀性及其所具有的最佳力学性能。有关不锈钢、钴-铬和钛合金的物理冶金方面的论述请参阅本手册的相关章节。

生物材料和生物医学器械工业与众不同的方面之一，就是尽管一般遵照 ASTM 或其他标准，但材料在销售和论述时所用的都是商业名称。于是，一种合金当其化学渊源可以追溯到普通的钴-铬合金时，可以有下列名称：Vitallium、Alivium、Endocast、orthochrome、Protasul 以及 Zimaloy。对于每一种在市场上销售的合金都有必要通过审查以确定其基本成分——即它是按照何种 ASTM 或其他技术标准进行生产和出售的。

不锈钢和钴-铬合金的耐一般性腐蚀的能力取决于铬的存在及其使合金变得惰性的能力。其他合金元素的加入将增加其耐不均匀型腐蚀(如点蚀)的能力。钛和钛合金无需铬也能形成惰性。表面惰性是最为重要的特征，但是表面粗糙度也会影响其性能。高度抛光的表面对腐蚀和磨损有较好的表现。

不锈钢。不锈钢由于相对价廉而普遍使用，它们可以用一般的技术进行成形，能在很大的范围里控制它们的力学性能，以期获取最佳强度和塑性。不锈钢可作为锻压合金使用。不锈钢移植物在进行消毒和包装运往医疗机构之前进行硝酸钝化，可以此增强其惰性。

即使是不锈钢的耐腐蚀性仍不足以适应移植物的长期使用。根据多项应用性 ASTM 技术标准，它们应用于骨螺钉、接骨板、骨髓内柱和其他临时性固定装置。例如，由 ASTM F55 规定的不锈钢含有 17%～19% Cr、12%～14% Ni、2%～3% Mo、最高 0.03% C 以及若干其他元素的最高限制含量。AISI 316L 包含在 ASTM F55 和 F138 中，它是一种最常用的不锈钢生物材料，因为它比其他不锈钢更耐点蚀。尽管 316L 的耐点蚀性已得以改进，但像大多数不锈钢一样，它对于缝隙腐蚀很敏感。

用于移植的不锈钢都是属于奥氏体型的，这是因为其良好的成形性。真空冶炼能提高合金的疲劳性能(AISI 316LVM,即 ASTM F138)。经过冷变形加工能提高其强度和耐疲劳性。型号 316L 不锈钢可以焊接，只是要注意不使器件产生敏感性。型号 302、304、304VAR(真空电弧熔炼)和 316L 在体内用于使用期限限定的金属丝。利用焊接和软钎焊可以将一根线的部分连接在另一根上，或者在引线上形成光滑的端部。

如前所述，不锈钢的耐腐蚀性还不足以满足在人体内长期使用要求，因此在进行结构性外科手术的过程中，接骨板、骨螺钉和其他移植物在骨骼接合并达到足够的骨骼强度之后，是一定要被取出来的。在 20 世纪 60 年代，早期的髋骨移植都采用不锈钢，而现在长期移植使用的金属材料都选择钴-铬合金或钛合金。

钴-铬合金。它是在 20 世纪 30 年代开始使用的。合金 Vitallium 作为铸造牙科合金使用，然后从 20 世纪 40 年代开始用于矫形方面的用途。钴-铬基合金的耐腐蚀性超过不锈钢的一个数量级，并且它们具有高的力学性能。

这种合金首先用作铸造器件。后来，锻压的钴-铬合金也投入使用。虽然针对钴-铬基合金的生物材料有数种的 ASTM 技术标准。但是主要使用的合金有两种：即铸造合金 Co-28Cr-6Mo(ASTM F75)和锻压合金 Co-20Cr-10Ni(ASTM F90)。锻压工艺已应用于按 F75 规定的改进成分合金。

钴-铬合金的冶金技术与钴基超合金的相同。其强化是借助于固溶元素及碳化物的存在而形成的。对有加工可能性的锻压合金进行冷变形加工能提高其强度。为了生产锻压的钴-铬合金，碳含量必须较之铸造合金大大降低(0.05% 之相对于大约 0.25% 或更高)。低碳含量说明，由碳化物形成的强化也较弱。为提高加工性，一般要降低铬含量和加入镍。锻压合金可以进行热变形加工，其中一些还能冷拔。屈服强度随晶粒的大小和在锻压制造过程中的冷变形加工程度而变化。

作为结构用途而生产的合金，如果要求最佳性能例如髋骨肢体可以锻造而成。钴-铬合金可以通过锻造工艺达到最高强度和韧性，但是无法形成均匀的晶粒大小。对按 F75 的规定改进的成分合金进行锻造所获得的数据表明，出现在末端(股骨柄的尖端即离球头的最远端)的晶粒大小比其邻近端的更小。从末端所取试件的强度(疲劳、屈服)也相应较好。

钴-铬合金的切削加工很困难。闭合模锻能将切削加工减少到最低限度，但是锻压而成的零件还会要求比铸件更多的加工。因此，常采用熔模铸造生产成本最低的钴-铬移植物。铸造零件的晶粒大小不可避免地大于相应的锻压零件，故而铸件的强度特性无法接近锻压的钴-铬合金。铸件的疏松可能是一个问题，但是可以通过改进模具的设计和真空熔模铸造合金在铸后处理中使用热等静压压制(HIP)予以控制。某些钴-铬零件也使用粉末冶金制造。据称粉末的热等静压压制能形成非常细的晶粒和极佳的性能，但是其成本较高。

生产钴-铬合金移植物的方法优选将是在成本与性能之间权衡的结果。当铸件的性能要求可以得到充

分满足时，铸件将作为首选。当要求最高强度时，热压和/或锻造将是决定性的。表3.14-72表明，锻造钴-铬合金相对其铸造合金具有力学性能的明显优势。由于铸造和锻压制品在化学成分和性质方面存在着明显的差别，故由此引起由化学成分和性质决定锻压合金强度的问题。表3.14-74比较了基本相同的钴-铬合金（锻压的低含碳量和稍低含铬量）分别在铸造和锻造条件下的强度。锻件的强度优势较为明显。

表3.14-74　锻造对Vitallium合金力学性能的影响

材料状态	抗拉强度		0.2%条件屈服强度		伸长率(%)	疲劳强度(意含10^6周,$R=-1$)	
	MPa	ksi	MPa	ksi		MPa	ksi
锻造的							
近端柄	1406.6	204.0	889.5	129.0	28.3	792.9	115.0
远端柄	1506.6	218.5	1029.4	149.3	27.5	827.4～965.3	120.0～140.0
铸造(典型的)	790	115	520	75	15	310	45

钛及其合金。它们的开发适用于有极佳生物相容性的移植部件，并且与移植物的周边组织极少甚至不会发生任何反应。钛由于在其表面形成的稳定氧化膜而获得强耐腐蚀性，这种膜即使发生破坏，也还能在体温下和生理体液里再次生成。尽管现已开发成功许多种类的钛合金，但是在工业上体内使用的主要还是Ti-6Al-4V和四种商业牌号的纯钛。其他钛合金如Ti-6Al-17Nb和Ti-15Mo也有生物材料的用途。

工业纯钛的力学性能取决于其含氧量。增加含氧量能提高屈服强度和降低塑性。Ti-6Al-4V的屈服强度和抗拉强度大大高于其纯金属的，还有良好的塑性（表3.14-72），而且在所有的结构性移植金属中，它具有最佳的综合性能。这种合金一般用锻造生产但也可以进行铸造，它还可以通过控制成分和调整制造工艺进行强化。钛合金通过加热会经历晶体组织的转变。转变温度（到高温，体心立方相，β）称为β相变温度。在β相变温度附近所采用的不同方法处理能使显微组织进一步细化。经过适当的处理有可能使其疲劳寿命提高2倍或更多。

钛的摩擦、磨损性能十分不同于大多数的其他金属。这是由于其坚韧的氧化膜所致。处于低载和低滑移速度的铰接条件下的这种薄膜能保持完整。然而如果这层膜如因磨损而损坏且不能及时再生，擦伤将会造成金属与金属的接触和冷焊。这种过程将导致非常高的摩擦和磨损率，故无法使用钛与钛（或其他金属）的铰接。如离子束移植和渗氮的一些方法对于提高耐磨性都很有用。

也许是钛的磨损特性阻碍它在矫形修复手术中得到更广泛的应用。然而，对于大部分零件，钛并不与其他金属材料或其自身进行铰接，而是用于定型结构的器件上，这时钛股骨柄将与钴-铬或陶瓷的球头一起使用，并且相对UHMWPE衬里形成铰接（例如全髋骨置换）。

形状记忆功能(SME)合金。这是一种能“记忆”以前形状的合金，甚至其零件已发生过明显的变形。形状记忆合金零件在加热到它的转变温度以前，能一直保持其变形形状，在该转变温度点上，零件能自动回复到原始形状。

基本上为等原子成分的镍-钛合金代表了一种类型的SME合金。已经证明，镍-钛合金确实有适当的生物相容性和耐腐蚀性，并且能作为临时性的断裂固定使用。镍-钛合金的应用包括人造合成接骨板、颚板和牙箍。

以人造合成接骨板为例，来说明SME合金的用途。将它们粘附在骨骼上，用以稳定断裂处并促使裂缝合拢。接骨板是采用SME合金按照需要的最终几何形状制造的，然后拉长8%并冷却。不要将板加热即在板上钻螺丝固定孔。随后将板贴附在患者的裂骨上。利用局部敷热（用热水或热风）将温度提高到转变温度以上，使接骨板回复到它原始的尺寸，由此产生的收缩和拉力促使裂缝表面弥合。

用于移植物的涂层

在有关矫形移植外科手术中的一个重要成果就是解决了骨骼在移植装置上的贴附问题。推动移植物的不断改进的主要原因（特别是现在，由于排除了不锈钢在铰接移植物上的使用，腐蚀问题已在很大程度上得到解决）就是移植物的松动。通过改进移植物与骨骼之间粘结，应该能增强移植物的稳定性并减少发生这种松动的可能。为设法提高关节的粘结强度，现已

开发出各种不同的方法。其中一些方法就是利用疏松的涂层使骨质向移植物内生长，现已在不同程度上取得了成功。

其中的一个方法是，将一种与基体合金有相容性的合金纤维粘附于移植物表面，以此产生一种疏松金属的涂层。将钛纤维用于 Ti-6Al-4V 的移植物上。另一种方法就是粘附金属粉末颗粒（常为球状）。利用粉末冶金技术将 Co-Cr-Mo 附于 Co-Cr 合金移植物上，和利用等离子技术将工业纯钛粉喷涂在 Ti-6Al-4V 移植物上。这些尝试方法的结果相互补偿，但是许多移植物都可以进行局部表面的疏松金属表面涂层。除了关注粘附工艺的功效以外，钛合金（因刻痕而引起的疲劳失效）还可感触到由于粉末在表面造成的刻痕，并因此使其疲劳寿命缩短。

提高粘附性的最为有效的工艺就是使用磷酸钙陶瓷（钙羟磷灰石复合材料 calcium hydroxyapatite，HA），用以提供在骨骼里所存在的元素。其机制是将一种具有生物活性的钙 HA 薄涂层粘结在移植物上。其涂层必须是能为人体所吸收，从而用以替代天然骨头里的磷酸钙。通过防止在移植物与骨骼间产生常见的纤维状组织层，而使金属移植物的高强度粘结得以保持。

可以采用等离子喷涂技术进行羟磷灰石涂层。因为 HA 涂层与基体之间是一种机械粘结，移植物表面必须粗糙化，粗糙的程度将影响其界面的强度。涂层的成分和稳定性的变化将影响临床的成功。羟磷灰石涂层被认为是有助于增加粘结强度的，但其使用结果会有差别。

用于牙科的金属生物材料

填牙用银汞合金（汞齐）。银汞合金的使用可追溯到 19 世纪，但对其给人体造成的有害影响却一般知道的甚少。银汞合金是一种用汞与含银、锡、铜和锌的合金粉末混合而成的粉末。其成分接近 $Ag_3Sn\gamma$ 相。汞齐反应在短时间里形成一种固化的合金，故牙科医生可以将汞齐膏填入蛀洞里。填牙用银汞合金用于修复牙齿的咀嚼表面，使其能承受沉重的压力。使用银汞合金的目的是为了在修复的过程中，在几个小时内就能形成足够的抗压强度，而且无需降低银汞合金的操作性。在临床应用的安置过程中，银汞合金的尺寸稳定性是很重要的。在银汞合金中，会发生长期的相变化，因此影响其性能。表 3.14-75 列出在牙科中使用的某些合金的性能。

表 3.14-75　一些典型的牙科用合金的性能

牙合金	比例极限		0.1%条件屈服强度		弹性模量		应变(%)	抗拉强度②		布氏硬度/(kg/mm²)③
	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi		MPa	ksi	
银汞合金										
New True Dentalloy	—	—	—	—	21.3	3.1	—	54 [318]	7.9 [46.1]	—
Dispersalloy	—	—	—	—	33.8	4.9	—	48 [423]	6.9 [61.3]	—
传统金合金										
型号 I，Ney Oro A	69	10	—	—	—	—	29.5	221	32	45
型号 II，Ney Oro A-1	190	27.5	—	—	—	—	32	379	55	95
型号 III，Ney Oro B-2										
软	221	32.0	—	—	—	—	35	421	61	110
硬	262	38.0	—	—	—	—	34	448	65	120
型号 IV，Ney Oro G-3										
软	286	41.5	—	—	99.3	14.4	24	469	68	140
硬	572	83.0	—	—	—	—	6.5	758	110	220
低金合金										
40Au-Ag-Cu（Forticast）										
软	—	—	379	55.0	—	—	18	562	81.5	177
硬	—	—	738	107	—	—	2	889	129	252

（续）

牙合金	比例极限		0.1%条件屈服强度		弹性模量		应变(%)	抗拉强度②		布氏硬度/(kg/mm²)③
	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	10^6psi		MPa	ksi	
低金合金										
10Au-Ag-Pd (paliney)										
软	438	63.5	—	—	—	—	17	558	81.0	150
硬	583	84.5	—	—	—	—	7	731	106	205
Ag-Pd (Albacast)										
软	—	—	262	38.0	—	—	10	434	63	130
硬	—	—	324	47.0	—	—	8	469	68	140
烤瓷金属金合金										
Ceramco O	—	—	—	—	86.2	12.5	5	—	—	131
镍-铬合金										
牙冠和牙桥合金	—	—	359	52	179.3	26.0	1.1	421	61	330HV
局部义齿合金	—	—	710	103	—	—	2.4	807	117	—
烤瓷金属合金	—	—	—	—	202.7	29.4	16	917	133	270HV
钴-铬合金										
铸造 Vitallium	—	—	644	93.4	217.9	31.6	1.5	869	126	—
线材										
奥氏体不锈钢	—	—	1372	199①	200.6	29.1	—	—	—	—
Elgiloy	—	—	1110	161①	171.0	24.8	—	—	—	—
β-钛	—	—	586	85①	71.7	10.4	—	—	—	—
Nitinol	—	—	193	28①	42.1	6.1	—	—	—	—
牙齿结构										
搪瓷(Enamel)	353	51.2	—	—	—	—	—	10[384]	1.5[55.7]	343HV
牙质(Dentin)	167	24.2	—	—	—	—	—	52[297]	7.5[43.1]	68HV

①0.05%条件屈服强度。 ②中括号里的数值抗压强度极限。 ③原文如此，单位疑有误，应为HB。——译者注。

当使用一种银汞合金修复蛀洞时，在银汞合金与牙齿材料之间并没有粘着性。这导致修复(填充)处的边缘开裂。在操作过程中，除了牙科医生混料和操作银汞合金的技术以外，银汞合金的尺寸稳定性及其使洞壁再次发生转动的能力都会影响裂缝。由于在裂缝、细孔和裂口或边缘处发生局部或裂隙腐蚀，从而导致填料的劣变。

牙用银汞合金具有脆弱性，因此造成拉伸和蠕变的失效。为防止其发生，牙科医生可以使其周边羽状化，并使发生高拉伸载荷的可能性降至最低。牙用银汞合金会在载荷的作用下发生蠕变，银汞合金中的含汞量将影响其抗蠕变性。

银汞合金的化学性质经历了很多年的变化。在生产中，球状粉末形状的不断改进使银汞合金的修补作用得以增强。此外，铜的加入通过消除所谓的 γ_2 相以改善其相反应，而 γ_2 相是一种锡-汞相，它会导致大多数填料发生长期的腐蚀。

金合金。它们通常应用于牙冠和牙桥桥托，人们出于对银-锡的银汞合金中的汞会对人体健康造成影响的担心转而选择金的蛀洞修补。在后面的例子里，金子的塑性是其应用的一大优点。将加工成的纯金薄膜作为一种填料在蛀洞中压制成形。

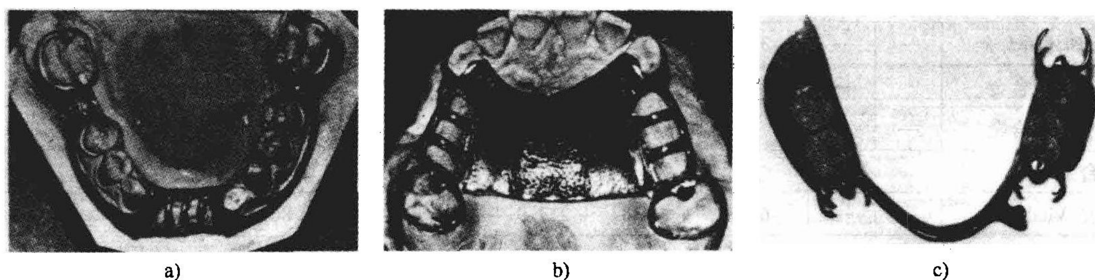
纯金可作为填料压制成形，或作为铸造材料用于牙冠和牙桥。在某些情况里，金子还可以用

于牙线并且作为合金应用于牙齿的低温焊料。因为金子的强度不太高，所以常开发成合金以提高强度并用于铸造。金箔使用时虽软，但是在填入蛀洞中时，经冷变形加工而得到硬化。经过适当挤压的金箔填料硬度大约是铸造金子的两倍。据说金子填料能与蛀洞的轮廓密切吻合以至于不会发生周边开裂。

用于铸造的金合金按照硬度和强度分为四大类。在型号Ⅰ合金中使用了固溶添加剂。型号Ⅱ至Ⅳ合金含有不同元素并通过固溶硬化和热处理实现硬化作用。合金中的含金百分比随合金的型号号数增加而减小，故型号Ⅳ合金的耐锈蚀性相对较低。市场上用牙合金的含金量范围约为50%~88%。

其他金属材料。如同镍-铬合金，铸造钴-铬合金在牙科中作为牙齿安置的框架用于固定牙桥和局部义齿(见图3.14-70)。奥氏体不锈钢可用于局部义齿，偶尔作为网状框架用以强化全口义齿。锻压钴-铬合金、镍-铬合金以及不锈钢可以制成金属丝用于畸齿矫正。所有这些合金的密度都小于金合金。对于钴-铬合金而言，机械强度提高(与金相比)且密度减小，从而能制造出更轻更薄的假牙。

钛合金似乎特别适合镶牙的用途，尤其是作为单桩核或多桩核的使用，后者上面安置多个牙齿(见图3.14-71)或永久性义齿。通过移植物植入下颚、上颌，以一种符合解剖学的方式让咀嚼应力传递到骨头上。螺纹和光滑的移植物都应用得很成功，尽管螺纹移植物要更好一些。钛牙移植物具有与颚骨质组织相当良好的整合性。



a) b) c)

图3.14-70 可取下的局部义齿，图示钴-铬合金的上、下部分以及附有牙齿的完整义齿。

a）钴-铬合金的上部分 b）钴-铬合金的下部分 c）完整义齿

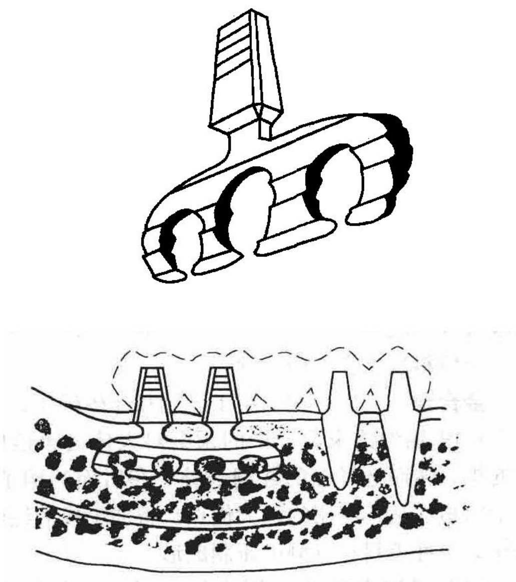


图3.14-71 图示未经涂层的牙齿移植物及其使用。桩核起到置换牙齿的支撑作用

陶瓷

生物惰性陶瓷。大部分的惰性陶瓷都是氧化物，它们都是最为稳定的陶瓷材料。碳素通常被认为是一种陶瓷，并且纯热解沉积碳也十分稳定。铝土(氧化铝)是最稳定的生物惰性的氧化物陶瓷，并且是极佳的能长期使用的陶瓷生物材料，然而部分稳定氧化锆也是一种能与之媲美的材料。骨骼在紧密对接中生长成为非疏松氧化铝，但是无法深入致密的陶瓷。

生物惰性陶瓷在人体中有几种应用。在髋骨的移植中发现，如氧化铝的一些经抛光的高密度陶瓷，当其与UHMWPE铰接所具有的摩擦和磨损比金属还低。陶瓷趋向于有很高的模量。它们比金属更硬而且更不易发生化学变化，但是缺乏常规意义上的塑性。

陶瓷一般采用粉末工艺方法制造。多晶体陶瓷的密度和晶粒大小取决于生产工艺和氧化物的纯度。较高的密度和较细的晶粒能获得强度较高、寿命较长的移植物。氧化铝的单晶体已经生产出来了，据报道有更好的强度性能。氧化铝和形成的碳素接近具有理想生物相容性的材料。

氧化铝作为牙科的移植物（特别在使用钛之前）用于将咀嚼力传递到颚骨上。在牙齿置换中，氧化铝的牙冠占到70%。牙冠是用尖晶石-刚玉（$MgAl_2O_4$/α-Al_2O_3）注塑而成的。氧化铝牙冠比金属牙冠更具美容方面的美观，并且其强度也高于传统的瓷质牙冠。

瓷质牙用陶瓷的耐腐蚀性非常高，而且它既有生物相容性又无生物劣化性。牙瓷属于K_2O-Al_2O_3-SiO_2系统，其强度一般与牙质和搪瓷相似。瓷质的力学和热性能对牙科用途是很有用的，尽管它的脆性只不过是一种次要的缺点。这一缺点可以通过改进瓷质以提高力学性能和将其罩在钴-铬、金或其他合金基体的外面予以克服。瓷质可以制成不同的颜色、透明度和表面光泽。

氧化铝中耳移植已经表明能与骨质组织形成良好的整合，以使那些耳骨组织受到损伤的人们的听力得到部分或较为完整的恢复。氧化铝还能以多晶体的形式作为填料用于骨骼的严重缺损，而这种缺损则是由于肿瘤或囊肿的切除而造成的，或者因为在膝关节整体移植的再粘结之前有不适宜的海绵骨形成。

生物活性的陶瓷。"生物活性"一般是指任何能引起一种特殊生理作用的材料，并借此在该材料与人体组织之间形成一种粘结。生物陶瓷、生物玻璃和玻璃陶瓷都是用以表示某些生物活性陶瓷的名称，它们都设计成能与人体组织发生作用。

钙HA（前面已述）是一种具有生物活性的陶瓷，它作为一种涂层用于金属牙齿移植和肢体矫形的手术上。羟磷灰石是人体骨骼中的主要成分，所以也是改进移植物/人体界面的潜在材料。HA一直被致力于作为修补骨骼缺损的填料（HA是从双组分混合物中析出来的）而使用，其设想就是能最终为人体所吸收，并成为新的骨骼组织。

一般来说，生物活性的陶瓷大多作为涂层应用，但是也一直在研究它们的许多结构性应用，包括生物玻璃材料在中耳移植和人造齿移植中的应用。

聚合材料、复合材料和粘结剂

聚合材料。由碳、氮、氧和其他元素或无机和有机物质结合而成。聚合材料可以单独或与金属及合金结合使用。有比较多的聚合材料可以作为生物材料应用，并常与合金相结合使用。

与金属和陶瓷不同，聚合材料并没有晶体组织。然而其复杂的结构的确会影响它们的性能。聚合材料是由较小、较简单分子（单体）的化学组合而形成的。聚合材料很少是纯净的，而更是基本聚合材料与为控制其性能所需的其他组分的结合体。聚合材料的强度性能不如金属和陶瓷，但是具有较轻的重量，而且在理论上说还可以通过改进达到最高的生物相容性和尚可满足需要的力学性能。

用于人工关节铰接置换中一端的主要聚合材料为UHMWPE。它有足够的强度承受压力，并且当以钴-铬或氧化物作为球头与之铰接时，所产生的摩擦和磨损都是非常低的。

具有双重目的的聚合材料PMMA应用于粘合剂（见本节后面所述）和在各种眼科装置（隐形眼镜、可植入眼镜和人造眼睛等）。它还能用于颅骨缺损手术，而且从20世纪30年代起就用于义齿。

编织纤维如戈尔·特克斯（Gore-Tex膨体聚四氟乙烯或PTFE）用于血管的移植。用于血管成形术的气囊是用聚酯薄膜制成。聚合材料的应用正在扩大，尤其在可再吸入材料的领域里。普通聚合材料及其医学上的使用如表3.14-76所示。

表3.14-76　普通聚合材料及其医学使用

聚合材料	典型用途
聚乙烯	管料，管接头和瓶，塑料外科移植
聚丙烯	一次性注射器，膜式氧合器的膜片，接头，指关节移植，不可吸收的缝合线
聚四氟乙烯，聚二氟亚甲基	血管移植物修复术，心脏修补，骨科U形夹板修复术，视网膜剥离治疗
聚苯乙烯	一次性的实验室用品（例如试管）
聚甲基丙烯酸甲酯（有机玻璃）	骨胶，人造牙齿、移植牙、义齿材料、牙科填充料，隐形眼镜，透析或超滤用膜片
聚氯乙烯	一次性医学用品，血液透析或血液灌流，血液管线，心导管、血袋、人造肢体材料
聚乙烯二甲基硅氧烷（硅橡胶）	塑料外科移植物，人造心脏，心脏辅助泵材料，心房短路，指关节修复，起搏材料，心脏起搏器导线
聚丙烯腈	透析用膜片
聚氨基甲酸酯	人造心脏泵材料和心脏辅助装置，主动脉内球囊泵（IABP）中用的球囊，心阀移植，血管移植物修复术，管料，血液相容性涂层
聚乙烯醇	药物释给系统

复合材料。这是一种双相材料，通常由增强纤维相和基体材料组成。有多种聚合材料基体被研究应用于生物材料。四氟乙烯基体中的碳纤维已经作为一种硬组织的置换物在移植术里得到应用。由于复合材料是疏松的，故一般会有纤维组织沿其空隙朝里生长。碳素纤维增强聚砜矫形移植物已经试制成功。利用几种可吸收的聚合材料-碳素系统生产复合材料筋腱。利用聚乙酸基体中的钙/磷基玻璃纤维生产的可全再吸收的断裂固定装置。

应用于牙科的聚合材料复合修复材料在20世纪60年代获得专利。BISGMA或甲基丙烯酸酯树脂与(质量分数)70%~约85%的陶瓷填料(石英、硅酸盐玻璃等)(体积分数约为50%~70%)结合使用，以此形成一种令人愉悦的美观且在机械和化学方面获得满意的修复。

粘结剂和浆料。使外科矫形移植物固定的主要方法就是将移植物粘结在恰当的位置上。在断裂矫形的处置中，粘性粘结剂的使用得并不广泛。普通使用的粘结剂为PMMA，实际上这是一种灌注浆料。粘结剂机械地粘附在骨骼和合金移植物上，但是不会在合金上形成冶金粘结。外科术后，骨柄与粘结剂能立即很好地粘结在一起，但是在移植物/骨间的粘结剂会发生长期性的松动。

虽然还评价过其他方法，但是从20世纪60年代以来，PMMA仍然保持其用于固定移植物的粘结剂中的地位。在移植物固定区域以PMMA为预涂层的应用表明，它能增强其界面的稳定性，故在外科手术里它能在合金与植人骨骼洞穴中的PMMA之间形成一种良好的粘结。氰丙烯酸酯及其他一些粘结剂也都经过评选，但是很难用于骨头与骨头或骨头与金属的粘结。

牙用粘结剂广泛应用于固定铸造桩核的修复，如金属和陶瓷的镶嵌物、牙桥和牙冠。它们还能在金属的填补物下面用于蛀洞的垫衬，以此保护牙齿免受热冲击。尽管某些牙用粘结剂如同化学粘结剂一样起作用，其主要功能就是作为一种很薄的填料将表面的微凸体糊平，以此便于粘结。牙用粘结剂包括磷酸锌、磷酸硅和增强氧化锌/丁子香酚/EBA，它们都已应用了许多年。

从20世纪60年代以来，环氧树脂粘结剂被广泛应用于可移植的医用装置上，如心脏起搏器、血液泵壳体、用疼痛控制的神经学装置及其他用途。环氧树脂具有极佳的金属和陶瓷物质的粘附性，并具有生物相容性。

总结

表3.14-77比较了几种普通移植材料与骨骼的力学性能。生物材料在人体环境中绝对是天天要使用的工业材料。金属能非常好地发挥其作用，但是其生物相容性好的几乎没有。陶瓷有其一席之地，然而关于早在1980年以前就首次制成的生物陶瓷的富有期待的陈述甚至还会在21世纪初时的文献中出现。聚合材料领域不断给人们以希望，但可供应用的聚合物生物材料的发展机遇仍遥遥无期。

表3.14-77　移植材料与皮层骨的力学性能比较

材料	弹性模量		抗拉强度		断裂韧度	
	GPa	10^6psi	MPa	ksi	MPa·$m^{1/2}$	ksi·$in^{1/2}$
氧化铝	365	55	6~55	0.9~8	~3	~3
钴-铬合金	230	35	900~1540	130~225	~100	~90
奥氏体不锈钢	200	30	540~1000	80~145	~100	~90
Ti-6Al-4V	106	15	900	130	~80	~70
皮层骨	7~30	1~4	50~150	7~20	2~12	2~11
PMMA(骨粘结剂)	3.5	0.5	70	10	1.5	1.4
聚乙烯	1	0.15	30	4		

潜在生物材料的基本冶金学和化学性质已经得到很好的开发。从20世纪70年代以来最佳矫形和牙科材料的一般性质并没有明显的改变，然而在其制造工艺和外科技术方面都已取得进步。包括复合修复材料和可移植的牙桥桩核、单晶体氧化铝、用于治疗烧伤的人造皮肤以及用于等离子喷涂的HA涂层的许多用途，都已得到开发并继续扩大。人们一直在期盼生物材料技术的新发展，但是占据其位的仍是用于生物医学的一些基础材料。

精选参考文献

- C.M. Agrawal, Reconstructing the Human Body Using Biomaterials, *J. Met.*, Vol 50 (No. 1), 1998, p 31-35.
- S.A. Barenberg, Abridged Report of the Committee to Survey the Needs and Opportunities for the Biomaterials

Industry, *J. Biomed. Mater. Res.*, Vol 22, 1988, p 1267–1291.
- J.S. Benson and J.W. Boretos, Biomaterials and the Future of Medical Devices, *Med. Device Diag. Ind.*, Vol 17 (No. 4), 1995, p 32–37.
- M.M. Black et al., Medical Applications of Biomaterials, *Phys. Technol.*, Vol 13, 1982, p 50–65.
- Directory to Medical Materials, *Med. Device Diag. Ind.*, published annually in the April issue.
- E. Duncan, Biomaterials: Looking for Information, *Med. Device Diag. Ind.*, Vol 13 (No. 1), 1991, p 140–143.
- P.M. Galletti, Artificial Organs: Learning to Live with Risk, *Tech. Rev.*, Nov/Dec 1988, p 34–40.
- P.M. Galletti, Organ Replacement by Man-Made Devices, *J. Cardiothoracic Vascular Anesthesia*, Vol 7 (No. 5), Oct 1993, p 624–628.
- J.S. Hanker and B.L. Giammara, Biomaterials and Biomedical Devices, *Science*, Vol 242, 11 Nov 1988, p 885–892.
- R.D. Lambert and M.E. Anthony, Standardization in Orthopaedics, *ASTM Stand. News*, Aug 1995, p 22–29.
- J.B. Park, *Biomaterials Science and Engineering*, Plenum Press, 1984.
- J.B. Park and R.S. Lakes, *Biomaterials: An Introduction*, Plenum Press, 1992.

非牙科或一般性应用的生物材料

- J.M. Courtney and T. Gilchrist, Silicone Rubber and Natural Rubber as Biomaterials, *Med. Biol. Eng. Comput.*, Vol 18, 1980, p 538–540.
- R.H. Doremus, Bioceramics, *J. Mater. Sci.*, Vol 27, 1992, p 285–297.
- A.C. Fraker and A.W. Ruff, Metallic Surgical Implants: State of the Art, *J. Met.*, Vol 29 (No. 5), 1977, p 22–28.
- R.A. Fuller and J.J. Rosen, Materials for Medicine, *Sci. Am.*, Vol 255 (No. 4), Oct 1986, p 119–125.
- B.S. Gupta, Medical Testile Structures: An Overview, *Med. Plast. Biomater.*, Vol 5 (No. 1), 1998, p 16, 19–21, 24, 26, 28, 30.
- G.H. Harth, "Metal Implants for Orthopedic and Dental Surgery," MCIC-74-18, Metals and Ceramics Information Center Report, Feb 1974.
- G. Heimke and P. Griss, Ceramic Implant Materials, *Med. Biol. Eng. Comput.*, Vol 18, 1980, p 503–510.
- D.S. Hotter, Band-Aids for Broken Bones, *Mach. Des.*, 4 April 1996, p 39–44.
- M. Hunt, Get Hip with Medical Metals, *Mater. Eng.*, Vol 108 (No. 4), 1991, p 27–30.
- A.J. Klein, Biomaterials Give New Life, *Adv. Mater. Process.*, May 1986, p 18–22.
- F.G. Larson, Hydroxyapatite Coatings for Medical Implants, *Med. Device Diag. Ind.*, Vol 16 (No. 4), 1994, p 34–40.
- D.C. Mears, Metals in Medicine and Surgery, *Int. Met. Rev.*, Vol 22, June 1977, p 119–155.
- D.S. Metsger and S.F. Lebowitz, Medical Applications of Ceramics, *Med. Device Diag. Ind.*, Vol 7, 1985, p 55–63.
- M. Moukwa, The Development of Polymer-Based Biomaterials Since the 1920s, *J. Met.*, Vol 49 (No. 2), p 46–50.
- S.J. Mraz, The Human Body Shop, *Mach. Des.*, 7 Nov 1991, p 90–94.
- K. Neailey and R.C. Pond, Metal Implants, *Mater. Eng.*, Vol 3, June 1982, p 470–478.
- D.E. Niesz and V.J. Tennery, "Ceramics for Prosthetic Applications—Orthopedic, Dental and Cardiovascular," MCIC-74-21, Metals and Ceramics Information Center Report, July 1974.
- P.C. Noble, Special Materials for the Replacement of Human Joints, *Met. Forum*, Vol 6 (No. 2), 1983, p 59–80.
- C.M. Rimnac et al., Failure of Orthopedic Implants: Three Case Histories, *Mater. Char.*, Vol 26, 1991, p 201–209.
- W. Rostoker and J.O. Galante, Materials for Human Implantation, *Trans. ASME*, Vol 101, Feb 1979, p 2–14.
- L.M. Sheppard, Building Teeth, Bones, and Other Body Parts with Ceramics, *Mater. Eng.*, April 1984, p 37–43.
- L.M. Sheppard, Cure It with Ceramics, *Adv. Mater. Process.*, May 1986, p 26–31.
- H. Shimizu, Metal/Ceramic Implants, *Med. Device Diag. Ind.*, Vol 8 (No. 7), 1986, p 30–35, 59–60.
- E. Smethurst and R.B. Waterhouse, Causes of Failure in Total Hip Prostheses, *J. Mater. Sci.*, Vol 12, 1977, p 1781–1792.
- T. Stevens, Prescription: Plastics, *Mater. Eng.*, Vol 108 (No. 4), 1991, p 23–26.

牙科用材料

- S. Bandyopadhyay, Dental Cements, *Met. Forum*, Vol 3 (No. 4), 1980, p 228–235.
- J.F. Bates and A.G. Knapton, Metals and Alloys in Dentistry, *Int. Met. Rev.*, Vol 22, March 1977, p 39–60.
- M.P. Dariel et al., New Technology for Mercury Free Metallic Dental Restorative Alloys, *Powder Metall.*, Vol 37 (No. 2), 1994, p 88.
- S. Espevik, Dental Amalgam, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol 7, 1977, p 55–72.
- R.M. German, Precious-Metal Dental Casting Alloys, *Int. Met. Rev.*, Vol 27 (No. 5), 1982, p 260–288.
- J.B. Moser, The Uses and Properties of Dental Materials, *Int. Adv. Nondestruct. Test.*, Vol 5, 1977, p 367–390.
- D.E. Southan, Dental Porcelain, *Met. Forum*, Vol 3 (No. 4), 1980, p 222–227.
- R.M. Waterstrat, Brushing up on the History of Intermetallics in Dentistry, *J. Met.*, Vol 42 (No. 3), 1990, p 8–14.

腐蚀和生物相容性

- J. Black, *Biological Performance of Materials: Fundamentals of Biocompatibility*, Marcel Dekker, 1981.
- A.C. Fraker, Corrosion of Metallic Implant and Prosthetic Devices, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, 1987, p 1324–1335.
- K. Hayashi, Biodegradation of Implant Materials, *JSME Int. J.*, Vol 30 (No. 268), 1987, p 1517–1525.
- H.J. Mueller, Tarnish and Corrosion of Dental Alloys, *Corrosion*, Vol 13, *ASM Handbook*, 1987, p 1336–1366.
- K.R. St. John, Biocompatibility Testing for Medical Implant Materials, *ASTM Stand. News*, March 1994, p 46–49.
- D.F. Williams, Corrosion of Implant Materials, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol 6, 1976, p 237–266.
- D.F. Williams, Tissue-Biomaterial Interactions, *J. Mater. Sci.*, Vol 22, 1987, p 3421–3445.

国际视野　科技前沿

★ **权威性。**这是一本由ASM组织美国学界、商界的有关金属材料各领域的知名学者、专家集体编撰、修订而成的专业手册，也是ASM过去八十多年来数以千计的冶金工作者的集体智慧和经验的结晶。它代表了金属材料学科在20世纪末的国际水平，虽然其出版已十年多，但作为一本工具书仍具有重要的参考价值。

★ **内容的丰富性和先进性。**它不仅囊括所有传统的金属材料，如铁、钢等黑色金属、有色金属以及它们的合金，而且还包括粉末冶金和当代许多特种用途的金属材料，同时还涉及当前在航空航天、纳米技术、超导技术、人体生物等领域所应用的各种新型金属材料。从内容上看，它同一般的材料手册一样，载有各种材料的齐全、可靠技术数据备查，且其主要篇幅都在于对各种金属材料的（有关物理、化学和金属学方面的）基础理论、特性和应用的全面阐述，包括当时的最新研究成果。本手册还用了将近一半的篇幅系统论述了各种金属的冶炼、铸造、压力加工、热处理以及切削加工几乎所有相关制造工艺及其检测技术和试验方法，其中还包括了近年来令人瞩目的有关摩擦学的实验研究方法。特别值得一提的是，本手册还包含多达3000多条与金属材料有关的技术术语的定义或准确解释，以及大量的文献目录，可供读者检索。

★ **简明性。**本书内容如此丰富、翔实，但却丝毫没给人以繁杂的感觉。相反，编写本手册的资深专家们仅用一些深入浅出的语言就把一些有关材料的深奥理论问题解释得十分清楚。这对于一本置于案头、可信手翻阅的手册来说是非常必要和难得的。可以说，只要具有大中专院校材料专业知识（包括非材料的机械类专业）的人员都能很好地理解和使用本手册。

★ **实用性。**本手册还有一个重要的特点，即通过各章的提示可以非常便捷地追溯到《ASM Handbook》的相关章节、通过各章和书末的参考文献目录可以检索到更加详细的相关内容。因此，它不仅适合配备于基层工矿企业的资料室里供广大机械、材料工程师们在工作中查阅，还可以作为材料学科的辅助教材供有关科研院所研究人员和高等学校师生参考。

上架指导：工业技术/材料工程

地址：北京市百万庄大街22号　邮政编码：100037
电话服务　网络服务
社服务中心：(010)88361066　门户网：http://www.cmpbook.com
销售一部：(010)68326294　教材网：http://www.cmpedu.com
销售二部：(010)88379649　封面无防伪标均为盗版
读者服务部：(010)68993821

ISBN 978-7-111-30708-2
封面设计：鞠杨
定价：370.00元

